



**Paulo José Tavanêz Ribeiro**

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

## **Análise Comparativa de Diferentes Modelos de Simulação Numérica na Avaliação da Ocorrência de Condensações Internas**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil - Perfil de Construção

Orientador: Prof. Doutor Fernando M. A. Henriques,  
Professor Catedrático da FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof<sup>a</sup>. Doutora Maria Teresa Grilo Santana  
Arguente: Prof. Doutor Daniel Aelenei  
Vogal: Prof. Doutor Fernando Manuel Anjos Henriques



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Maio de 2013**



# **Análise Comparativa de Diferentes Modelos de Simulação Numérica na Avaliação da Ocorrência de Condensações Internas**

Copyright © Paulo José Tavanêz Ribeiro,

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Professor Fernando M. A. Henriques pelo aconselhamento prestado, pela ajuda, espírito crítico e pela paciência que teve ao longo da realização desta dissertação.

Ao Engenheiro Fernando Jorne, pela disponibilidade e apoio prestado.

Aos meus pais e aos meus irmãos e amigos, pelo apoio e motivação.

À Ana, pela inspiração que me proporcionou sempre e pela sua eterna compreensão.



## RESUMO

A presença de humidade nos elementos construtivos constitui uma das principais causas de patologias que ocorrem nos edifícios e que, por sua vez, produzem uma degradação crescente dos materiais e do seu desempenho higrotérmico. Na realidade, o comportamento higrotérmico é influenciado por um conjunto de parâmetros que actuam desde o exterior – temperatura, humidade relativa, radiação e a pluviosidade que incide na fachada – e factores que actuam desde o interior – carga de humidade relativa interna e temperatura.

Em determinadas situações, a conjugação dos factores referidos anteriormente e a constituição da parede produz incrementos de humidade na solução construtiva, que podem causar fenómenos de condensação interna nos elementos construtivos, assunto em estudo na presente dissertação.

Os modelos utilizados para o estudo das condensações internas são o método de Glaser, para o regime estacionário, e o programa de cálculo numérico WUFI Pro 4.2 IBP, para o regime variável. O modelo estacionário representa uma forma mais prática e simplificada para determinar o risco de ocorrência de condensações, contrariamente ao modelo variável que trata o assunto partindo de um quadro mais completo e realista.

O estudo do fenómeno pelo modelo variável permitiu a análise detalhada do comportamento de um conjunto de variáveis, e o modelo estacionário foi utilizado de forma comparativa, no sentido de determinar as diferenças entre os resultados de ambos na avaliação do risco de ocorrência de condensações internas.

Na sequência da realização de um conjunto de simulações numéricas em regime variável e estacionário foi possível obter as condições de humidade e temperatura em diferentes tipos de parede expostos ao clima de Lisboa, os efeitos que produzem diferentes camadas da parede e o cumprimento de um conjunto de regras para evitar a ocorrência de condensações internas.

São também apresentadas as condições de humidade de diferentes tipos de isolamento térmico numa mesma solução de parede, e das condições a que um tipo de material de isolamento está exposto nas diferentes soluções de parede simuladas.

**Palavras-chave:** WUFI; Modelos Higrotérmicos; Simulação Higrotérmica; Humidade Relativa; Condensações Internas, Método de Glaser; Regime Variável.





## ABSTRACT

The presence of humidity in walls, that produce a rising degradation of materials and their hygrothermal performance, is one of the main causes of damage in buildings. Actually, the hygrothermal behavior is influenced by a group of parameters that act from the exterior – temperature, relative humidity, radiation and driving rain – and factors that act from the interior side – the internal relative humidity and temperature.

In certain situations, the conjugation of the factors referred previously and the constitution of the wall produce increased moisture in the building envelope, which can lead to interstitial condensation phenomena, subject under study in this dissertation.

The models used in the study of interstitial condensation are the Glaser method, used in the steady regime, and the numerical simulation software WUFI Pro 4.2 IBP, which is used in the transient regime. The steady model represents a more practical and simplified way to determine the interstitial condensation risk, in opposition to the transient model, which uses a more complete and real framework to manage this subject.

The study of this phenomena by the transient method gave the possibility to analyse the detailed behavior of different parameters. The steady method was used to determine the differences between the results of both calculation methods in determining the risk of interstitial condensation.

After processing a group of numerical simulations in the transient and steady regime it was possible to obtain conclusions about humidity and temperature conditions in different types of wall exposed to Lisbon climate conditions, check the effects of different elements in the wall and the respect of a number of rules in order to avoid internal condensation.

Humidity conditions in different types of thermal insulation in the same wall solution were also presented, and the conditions of one type of thermal insulation exposed to the different types of wall that were simulated.

**Keywords:** WUFI; Hygrothermal Models; Hygrothermal Simulation; Relative Humidity; Interstitial Condensation; Glaser Method; Transient Method;



# ÍNDICE DE MATÉRIAS

Resumo.....	i
Abstract.....	iii
Índice de Matérias .....	v
Índice de Tabelas.....	ix
Índice de Figuras.....	xiii
Simbologia .....	xxi
1. Introdução .....	1
1.1. Motivação e enquadramento do tema .....	1
1.2. Objectivos .....	1
1.3. Plano de trabalho .....	2
2. Métodos de avaliação da ocorrência de condensações internas em paredes .....	5
2.1. Comportamento do ar húmido .....	5
2.2. Condensações internas.....	7
2.3. Avaliação em regime estacionário pelo Método de Glaser .....	7
2.4. Avaliação em regime variável a partir do WUFI Pro 4.2 IBP .....	11
2.4.1. Transporte de calor e humidade em regime variável .....	12
2.4.2. Equações de transporte de calor e humidade em regime variável.....	13
2.4.3. Parâmetros e opções do <i>software</i> .....	14
2.4.3.1. Discretização do elemento construtivo e posições de monitorização .....	16
2.4.3.2. Parâmetros básicos dos materiais.....	17
2.4.3.3. Parâmetros adicionais dos materiais.....	20
2.4.3.4. Difusão de vapor de água .....	28
2.4.3.5. Coeficientes de transferência de água líquida .....	31

2.4.3.6. Orientação, inclinação e altura .....	32
2.4.3.7. Coeficientes de transferência superficial .....	34
2.4.3.8. Transferência de vapor de água.....	39
2.4.3.9. Revestimentos de superfície .....	40
2.4.3.10. Factor de redução da precipitação .....	40
2.4.4. Clima interior e exterior .....	40
2.4.4.1. Ficheiro Climático.....	41
2.4.4.2. Curvas sinusoidais .....	44
2.4.4.3. Norma EN13788 .....	44
2.4.4.4. Norma EN 15026 .....	46
2.4.5. Condições iniciais .....	46
2.4.6. Período de cálculo e perfis .....	47
2.4.7. Numérico.....	48
2.4.8. Leitura de resultados.....	49
2.5. Regras de concepção de paredes para evitar a ocorrência de condensações internas.....	52
3. Simulação de soluções construtivas de parede em regime variável e estacionário .....	55
3.1. Condições iniciais admitidas para as simulações em regime variável .....	55
3.2. Simulação de diferentes factores em regime variável.....	55
3.2.1. Análise de sensibilidade associada à alteração da orientação da fachada .....	56
3.2.1.1. Efeitos das diferentes orientações de fachada .....	56
3.2.2. Análise de sensibilidade associada à alteração da tonalidade do revestimento exterior61	
3.2.2.1. Efeitos das diferentes tonalidades do revestimento.....	62

3.2.3. Análise de sensibilidade associada à alteração da espessura do pano de alvenaria .....	69
3.2.3.1. Efeitos das diferentes espessuras do pano de alvenaria .....	69
3.2.4. Análise de sensibilidade associada à alteração das condições do ambiente interior .....	72
3.2.4.1. Efeitos dos diferentes tipos de ambiente interior .....	73
3.3. Simulação de várias soluções construtivas de parede em regime variável e estacionário .....	78
3.3.1. Risco de ocorrência de condensações internas em regime variável .....	79
3.3.1.1. Análise da ocorrência de condensações internas .....	81
3.3.2. Comparativo entre regime variável e regime estacionário .....	87
3.3.2.1. Comparação entre as soluções PD2 e PD2a .....	88
3.3.2.2. Análise dos Resultados .....	94
3.3.3. Temperaturas de interface com alteração da posição da camada de isolamento térmico segundo o método de Glaser .....	101
3.3.3.1. Análise dos Resultados .....	104
3.3.4. Teor de humidade no isolamento térmico .....	108
3.3.4.1. Teor de humidade em diferentes tipos de isolamento térmico inseridos na mesma solução construtiva .....	108
3.3.4.2. Análise das condições na fronteira e no centro do isolamento térmico para o conjunto de soluções de parede simuladas .....	116
4. Conclusões e sugestões para desenvolvimentos futuros .....	125
4.1. Conclusões .....	125
4.2. Sugestões para desenvolvimentos futuros .....	129
Referências Bibliográficas .....	131
Anexos .....	133

Anexo A.....	133
Anexo B.....	141
Anexo C.....	142
Anexo D.....	150
Anexo E.....	155
Anexo F.....	162

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Resistência térmica superficial.....	9
Tabela 2.2 – Classes de humidade interior segundo a norma EN ISO 13788 .....	45
Tabela 2.3 – Regras aplicáveis a cada disposição construtiva de parede dupla e simples, com isolamento pelo interior (Adaptado de: Couasnet,1990).....	53
Tabela 3.1 – Caracterização da solução construtiva utilizada na análise de diferentes orientações da fachada .....	56
Tabela 3.2 – Caracterização da solução construtiva utilizada na análise de diferentes tonalidades da fachada .....	62
Tabela 3.3 – Caracterização das soluções construtivas utilizadas na análise de diferentes espessuras.....	69
Tabela 3.4 – Caracterização da solução construtiva utilizada na análise das Normas que definem o ambiente interior .....	73
Tabela 3.5 – Análise de ocorrência de condensações internas em diferentes paredes simples com isolamento térmico pelo interior .....	81
Tabela 3.6 - Análise de ocorrência de condensações internas em diferentes paredes simples com isolamento térmico pelo exterior .....	83
Tabela 3.7 - Análise de ocorrência de condensações internas em diferentes paredes duplas .....	84
Tabela 3.8 – Comparativo entre WUFI e Glaser para valores médios diários – Face interior do reboco exterior .....	95
Tabela 3.9 – Comparativo entre WUFI e Glaser para valores médios mensais – Face interior do reboco exterior .....	95
Tabela 3.10 – Comparativo entre WUFI e Glaser para valores condicionantes – Face interior do reboco exterior .....	96
Tabela 3.11 – Comparativo entre WUFI e Glaser para valores médios diários - Face interior do pano exterior da parede/ Face exterior do I.T. ....	97

Tabela 3.12 – Comparativo entre WUFI e Glaser para valores médios mensais - Face interior do pano exterior da parede/ Face exterior do I.T. ....	98
Tabela 3.13 – Comparativo entre WUFI e Glaser para valores condicionantes - Face interior do pano exterior da parede/ Face exterior do I.T. ....	98
Tabela 3.14 – Comparativo entre WUFI e Glaser para valores médios diários – Face interior do I.T. ....	99
Tabela 3.15 – Comparativo entre WUFI e Glaser para valores médios mensais – Face interior do I.T. ....	99
Tabela 3.16 – Comparativo entre WUFI e Glaser para valores condicionantes – Face interior do I.T. ....	100
Tabela 3.17 - Caracterização da solução construtiva utilizada na análise da vários isolamentos térmicos na mesma solução construtiva .....	109
Tabela 3.18 – Parâmetros básicos dos materiais de isolamento térmico utilizado .....	109
Anexo A - Tabela 1 - Caracterização da solução construtiva PS1 .....	133
Anexo A - Tabela 2 - Caracterização da solução construtiva PS2 .....	133
Anexo A - Tabela 3 - Caracterização da solução construtiva PS2a .....	134
Anexo A - Tabela 4 - Caracterização da solução construtiva PS3 .....	134
Anexo A - Tabela 5 - Caracterização da solução construtiva PS4 .....	135
Anexo A - Tabela 6 - Caracterização da solução construtiva PS5 .....	135
Anexo A - Tabela 7 - Caracterização da solução construtiva PS6 .....	136
Anexo A - Tabela 8 - Caracterização da solução construtiva PD1 .....	136
Anexo A - Tabela 9 - Caracterização da solução construtiva PD2 .....	137
Anexo A - Tabela 10 - Caracterização da solução construtiva PD2a .....	137
Anexo A - Tabela 11 - Caracterização da solução construtiva PD3 .....	138
Anexo A – Tabela 12 - Caracterização da solução construtiva PD3 .....	138
Anexo A - Tabela 13 - Verificação das recomendações CSTB pelas soluções construtivas simuladas .....	139



Anexo A - Tabela 14 - Verificação dos valores de referência do coeficiente de transmissão térmica, U, para cada zona climática de Inverno, em Portugal. ....	139
Anexo B – Tabela 15 – Parâmetros dos materiais utilizados nas simulações higrotérmicas. ....	141
Anexo D - Tabela 16 – Dados das simulações realizadas no sub-capítulo 3.2.1 .....	150
Anexo D - Tabela 17 – Dados das simulações realizadas no sub-capítulo 3.2.2 .....	151
Anexo D - Tabela 18 – Dados das simulações realizadas no sub-capítulo 3.2.3 .....	152
Anexo D - Tabela 19 – Dados das simulações realizadas no sub-capítulo 3.2.4 .....	153
Anexo D - Tabela 20 – Dados das simulações realizadas no sub-capítulo 3.3 .....	154
Anexo E - Tabela 21 – Comparação entre a simulação numérica do WUFI sem pluviosidade incidente e o método de Glaser com valor médio diário das condições externas de temperatura e humidade relativa, para o dia 21 de Fevereiro.....	155
Anexo E - Tabela 22 – Comparação entre a simulação numérica do WUFI sem pluviosidade incidente e o método de Glaser com valor médio mensal das condições externas de temperatura e humidade relativa, para o mês de Fevereiro.....	156
Anexo E - Tabela 23 – Comparação entre a simulação numérica do WUFI sem pluviosidade incidente e o método de Glaser com valores mais gravosos das condições externas de temperatura e humidade relativa, para o dia 21 de Fevereiro.....	157
Anexo E - Tabela 24 – Comparação entre a simulação numérica do WUFI sem pluviosidade incidente e o método de Glaser com valor médio diário das condições externas de temperatura e humidade relativa, para o dia 21 de Fevereiro.....	158
Anexo E - Tabela 25 – Comparação entre a simulação numérica do WUFI sem pluviosidade incidente e o método de Glaser com valor médio mensal das condições externas de temperatura e humidade relativa, para o mês de Fevereiro.....	159
Anexo E - Tabela 26 – Comparação entre a simulação numérica do WUFI sem pluviosidade incidente e o método de Glaser com valor mais gravoso das condições externas de temperatura e humidade relativa, para o dia 21 de Fevereiro.....	161



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1- Diagrama Psicrométrico .....	6
Figura 2.2 – Representação esquemática dos mecanismos de transporte higrotérmicos .....	12
Figura 2.3 – Esquema representativo dos dados, resultados e interpretações possíveis das simulações higrotérmicas .....	15
Figura 2.4 – Interface do menu de configuração e montagem do elemento construtivo .....	16
Figura 2.5 – Interface da base de dados dos materiais .....	17
Figura 2.6 – Mecanismos de transporte de humidade .....	20
Figura 2.7– <i>Curva de armazenamento de humidade</i> .....	21
Figura 2.8 - Fluxo de água líquida num poro com secção variável .....	23
Figura 2.9 – Comparação entre curvas de armazenamento de humidade com valores medidos e aproximados pelo WUFI (Fonte: WUFI Help) .....	26
Figura 2.10 - <i>Curva de armazenamento de humidade</i> criada pelo WUFI para materiais artificiais .....	28
Figura 2.11 – Interface do menu Orientação / Inclinação / Altura .....	33
Figura 2.12 – Interface do menu dos coeficientes de transferência superficiais .....	34
Figura 2.13 – Interface de definição dos dados climáticos (WUFI Pro) .....	41
Figura 2.14 – Selecção do ficheiro climático de Lisboa .....	42
Figura 2.15 – Temperaturas do ficheiro climático de Lisboa no período de um ano .....	42
Figura 2.16 – Humidade relativa do ficheiro climático de Lisboa no período de um ano .....	43
Figura 2.17 – Análise climática do ficheiro de Lisboa .....	43
Figura 2.18 – Variação das classes de humidade interna com a temperatura externa segundo a norma EN ISO 13788 .....	45
Figura 2.19 – Funções de temperatura e humidade interior segundo a norma pr15026 .....	46
Figura 2.20 – Menu de definição das condições iniciais do elemento construtivo .....	47

Figura 2.21 – Menu de definição do período de tempo da simulação higrotérmica.....	48
Figura 2.22 – Menu de definição das opções de cálculo numérico do WUFI .....	49
Figura 2.23 – Exemplo de resultados provenientes das posições de monitorização.....	50
Figura 2.24 – Exemplo de resultados em filme do perfil da parede.....	50
Figura 2.25 – Exemplo de resultados em formato <i>course</i> .....	51
Figura 2.26 – Menu para exportação de resultados (WUFI Pro) .....	51
Figura 3.1 – Pluviosidade para diferentes orientações de parede.....	57
Figura 3.2 - Variação da humidade relativa na face interior do reboco exterior para várias orientações da fachada em função do tempo (01-01-2015 a 1-01-2016).....	57
Figura 3.3 – Fluxo de água transportada pelos capilares na face interior do reboco exterior, para diferentes orientações de parede .....	58
Figura 3.4 – Valores máximos e mínimos de humidade relativa na face interior do reboco exterior, correspondentes a um período entre Outubro e Maio para a simulação base (à esquerda) e a simulação com coeficiente de absorção de radiação nulo (à direita) .....	59
Figura 3.5 – Variação da humidade relativa no centro do pano de alvenaria de tijolo cerâmico furado para várias orientações de fachada em função do tempo (01-01-2015 a 01-01-2016).....	60
Figura 3.6 – Fluxo de água transportada pelos capilares no centro do pano de alvenaria, para diferentes orientações de parede .....	60
Figura 3.7 - Valores máximos e mínimos de humidade relativa no centro do pano de alvenaria, correspondentes a um período entre Outubro e Maio para a simulação base (à esquerda) e a simulação com coeficiente de absorção de radiação nulo (à direita) .....	61
Figura 3.8 – Temperatura da superfície exterior da parede para três tonalidades diferentes	62
Figura 3.9 – Temperatura da superfície exterior da parede para três tonalidades diferentes	63
Figura 3.10 – Humidade relativa no reboco exterior para três tonalidades de revestimento exterior: branco, claro, e escuro .....	64
Figura 3.11 – Fluxo de água transportada pelos capilares no na face interior do reboco exterior, para diferentes tonalidades do revestimento.....	65

Figura 3.12 – Valores de humidade relativa e temperatura máximos e mínimos na face interior do reboco exterior, para diferentes tonalidades .....	65
Figura 3.13 - Humidade relativa no pano de alvenaria de tijolo cerâmico furado para três tonalidades de revestimento exterior: branco, claro, e escuro .....	66
Figura 3.14 - Fluxo de água transportada pelos capilares no centro do pano de alvenaria, para diferentes tonalidades do revestimento .....	67
Figura 3.15 – Diferença de teor de humidade entre a face exterior do pano de alvenaria e o seu centro .....	68
Figura 3.16 – Valores de humidade relativa e temperatura máximos e mínimos no centro do pano de alvenaria de tijolo cerâmico, para diferentes tonalidades .....	68
Figura 3.17 – Humidade relativa no pano de alvenaria de tijolo furado para diferentes espessuras de alvenaria em função do tempo (01-01-2015 a 31-12-2015) .....	70
Figura 3.18 - Fluxo de água transportada pelos capilares no centro do pano de alvenaria, para diferentes espessuras do pano de alvenaria .....	70
Figura 3.19 – Diferença entre o teor de humidade entre a face interior da camada de argamassa e o centro do pano de alvenaria, para o período de um ano .....	71
Figura 3.20 – Valores extremos de humidade relativa no centro do pano de alvenaria de tijolo cerâmico, entre Outubro e Maio, para diferentes espessuras.....	72
Figura 3.21 – Humidade relativas do ambiente interior correspondentes às normas EN15026 (Normal e Elevado) e EN13788 (Níveis 3 e 4) .....	74
Figura 3.22 – Temperaturas do ambiente interior correspondentes às normas EN15026 e EN13788 .....	74
Figura 3.23 – Humidade relativa no reboco interior para os níveis normal e elevado das normas EN13788 e EN15026.....	76
Figura 3.24 – Valores extremos de humidade relativa, na face interior do reboco interior, para diferentes ambientes interiores.....	76
Figura 3.25 – Humidade relativa no centro do pano de alvenaria de tijolo furado de 22cm para os níveis normal e elevado das normas EN13788 e EN15026 .....	77

Figura 3.26 – Valores extremos de humidade relativa no centro do pano de alvenaria para diferentes tipos de ambiente interior.....	77
Figura 3.27 – Temperatura, humidade relativa e teor de humidade na solução PD3.....	79
Figura 3.28 – Humidade relativa na face interior do reboco exterior na solução PD3, com presença e ausência de pluviosidade incidente.....	80
Figura 3.29 – Humidade relativa na face exterior do isolamento térmico da solução PD3, com presença e ausência de pluviosidade incidente .....	80
Figura 3.30 – Humidade relativa e temperatura do ambiente exterior do dia 21 de Fevereiro do ano de referência do ficheiro climático de Lisboa .....	87
Figura 3.31 – Temperatura, humidade relativa e teor de humidade para o perfil das soluções PD2 (à esquerda) e PD2a (à direita) .....	88
Figura 3.32 – Temperatura, pressão parcial e pressão de saturação para os perfis da solução PD2 (à esquerda) e solução PD2a (à direita) .....	89
Figura 3.33 – Diferença de pressão para o regime variável e para o regime estacionário durante o dia 21 de Fevereiro na interface entre o reboco exterior e o pano exterior de alvenaria – Valores médios diários na solução PD2 .....	90
Figura 3.34 - Diferença de pressão para o regime variável e para o regime estacionário durante o dia 21 de Fevereiro na interface entre o reboco exterior e o pano exterior de alvenaria – Valores médios diários na solução PD2a .....	90
Figura 3.35 - Diferença de pressão para o regime variável e para o regime estacionário durante o dia 21 de Fevereiro na face interior do pano exterior de alvenaria – Valores médios diários na solução PD2 .....	91
Figura 3.36 - Diferença de pressão para o regime variável e para o regime estacionário durante o dia 21 de Fevereiro na face interior do pano exterior de alvenaria – Valores médios diários na solução PD2a .....	92
Figura 3.37 – Diferença de pressão para o regime variável e para o regime estacionário durante o dia 21 de Fevereiro na face interior do isolamento térmico – Valores médios diários na solução PD2.....	93

Figura 3.38 - Diferença de pressão para o regime variável e para o regime estacionário durante o dia 21 de Fevereiro na face interior do isolamento térmico – Valores médios diários na solução PD2a.....	93
Figura 3.39 – Posicionamento do isolamento térmico na solução construtiva para a análise dos interfaces, com isolamento pelo exterior (à esquerda) e isolamento pelo interior (à direita) .....	101
Figura 3.40 – Humidade relativa e temperatura correspondentes às piores condições exteriores de cada mês .....	102
Figura 3.41 – Humidade relativa e temperatura correspondente às médias mensais exteriores de cada mês .....	102
Figura 3.42 – Humidade relativa e temperatura correspondentes às piores condições interiores de cada mês .....	103
Figura 3.43 - Humidade relativa e temperatura correspondente às médias mensais interiores de cada mês.....	103
Figura 3.44 – Interface 1 – Variação da temperatura ao longo do ano para os valores mais condicionantes e valores médios do ambiente exterior, para uma solução.....	104
Figura 3.45 – Interface 1 – Diferenças de pressão correspondentes aos dados médios e mais condicionantes mensais, considerando o isolamento térmico colocado pelo exterior ou pelo interior .....	105
Figura 3.46 – Interface 2 – Variação da temperatura ao longo do ano para os valores mais condicionantes e valores médios do ambiente exterior, para uma solução com isolamento pelo exterior ou pelo interior .....	106
Figura 3.47 – Interface 2 – Diferenças de Pressão correspondentes aos dados médios e mais condicionantes mensais, considerando o isolamento térmico colocado pelo exterior ou pelo interior .....	107
Figura 3.48 – Interface 3 – Variação da temperatura ao longo do ano para os valores mais condicionantes e valores médios do ambiente exterior, para uma solução com isolamento pelo exterior ou pelo interior .....	107
Figura 3.49 – Interface 3 – Diferenças de Pressão correspondentes aos dados médios e mais condicionantes mensais, considerando o isolamento térmico colocado pelo exterior ou pelo interior .....	108

Figura 3.50 – <i>Curva de armazenamento de humidade</i> para quatro tipos de isolamento térmico .....	110
Figura 3.51 – Condutibilidade térmica em função do teor de humidade utilizada no WUFI.	110
Figura 3.52 – Humidade relativa na camada de poliestireno expandido extrudido (XPS) durante o mês de Fevereiro, com presença e ausência de pluviosidade incidente na fachada .....	111
Figura 3.53 - Humidade relativa na camada de espuma rígida de poliuretano (PUR) durante o mês de Fevereiro, com presença e ausência de pluviosidade incidente na fachada .....	112
Figura 3.54 – Humidade relativa na camada de lã mineral (MW) durante o mês de Fevereiro, com presença e ausência de pluviosidade incidente na fachada.....	112
Figura 3.55 - Humidade relativa na camada de poliestireno expandido (EPS) durante o mês de Fevereiro, com presença e ausência de pluviosidade incidente na fachada .....	113
Figura 3.56 – Fluxo total de humidade na face exterior do isolamento térmico, para diferentes tipos de material de isolamento térmico .....	114
Figura 3.57 – Teor de humidade da lã mineral (MW) numa solução construtiva com isolamento térmico pelo interior.....	115
Figura 3.58 – Teor de Humidade de diferentes tipos de isolamento térmico numa solução construtiva com isolamento pelo interior.....	115
Figura 3.59 – Teor de humidade máximo e mínimo para vários tipos de isolamento térmico numa solução de parede simples com isolamento colocado pelo interior .....	116
Figura 3.60 – Teor de humidade do isolamento térmico na solução construtiva PS5 .....	117
Figura 3.61 – Teor de humidade do isolamento térmico nas soluções construtivas PS5 e PS6 .....	118
Figura 3.62 – Fluxos totais de humidade na face exterior do isolamento térmico, para as paredes PS4, PS5 e PS6. ....	119
Figura 3.63 – Teor de humidade do isolamento térmico para as soluções PS2, PS3, PD2 e PD3.....	119
Figura 3.64 - Fluxos totais de humidade na face interior do isolamento térmico, para as paredes PD2, PS2, PD3 e PS3 .....	120



Figura 3.65 – Teor de humidade do isolamento térmico para as soluções construtivas PS2a, PD2a e PD3a com presença e ausência de pluviosidade.....	121
Figura 3.66 – Fluxos totais de humidade na face exterior do isolamento térmico, para as paredes PD3a, PD2a e PS2a.....	122
Figura 3.67 – Teores de humidade máximos e mínimos, para diferentes soluções construtivas para o mês de Fevereiro.....	123
Anexo A – Figura 1 - Portugal Continental. Zonas climáticas de Inverno.....	140
Anexo C – Figura 2 – Radiação solar para a direcção Norte .....	142
Anexo C - Figura 3 – Radiação solar para a direcção Sul .....	142
Anexo C – Figura 4 – Radiação solar para a direcção Este.....	143
Anexo C – Figura 5 – Radiação solar para a direcção Sudoeste .....	143
Anexo C - Figura 6 – Radiação solar para a direcção Oeste .....	144
Anexo C - Figura 7 – Humidade relativa na face interior do reboco exterior com todos os parâmetros activos .....	144
Anexo C - Figura 8 – Humidade relativa na face interior do reboco exterior com o coeficiente de absorção de radiação solar $\alpha_s$ nulo.....	145
Anexo C - Figura 9 – Humidade relativa na face interior do reboco exterior com a emissividade $\varepsilon$ nula .....	145
Anexo C - Figura 10 – Humidade relativa na face interior do reboco exterior com o cálculo de calor latente de evaporação/condensação desactivado.....	146
Anexo C - Figura 11 – Humidade relativa na face interior do reboco exterior com o valor de resistência térmica superficial exterior constante ( $R_{se}=0,0588\text{m}^2\text{C/W}$ ).....	146
Anexo C - Figura 12 - Humidade relativa no centro do pano de alvenaria com todos os parâmetros activos .....	147
Anexo C - Figura 13 - Humidade relativa no centro do pano de alvenaria com o coeficiente de absorção de radiação solar $\alpha_s$ nulo.....	147
Anexo C - Figura 14 - Humidade relativa no centro do pano de alvenaria com a emissividade $\varepsilon$ nula.....	148

Anexo C - Figura 15 - Humidade relativa no centro do pano de alvenaria com o cálculo de calor latente de evaporação/condensação desactivado.....	148
Anexo C - Figura 16 - Humidade relativa na face interior do reboco exterior com o valor de condutância térmica superficial constante ( $h_{ext}=0,0588m^2C/W$ ).....	149
Anexo F – Figura 17 – PS1 – Humidade relativa na face interior do reboco interior ao longo do último ano de simulação, com e sem pluviosidade incidente .....	162
Anexo F – Figura 18 – PS2 – Humidade relativa no centro do isolamento térmico ao longo do último ano de simulação, com e sem pluviosidade incidente .....	162
Anexo F – Figura 19 – PS2a – Humidade relativa na face interior do isolamento térmico ao longo do último ano de simulação, com e sem pluviosidade incidente .....	163
Anexo F – Figura 20 – PS3 – Humidade relativa na face exterior do isolamento térmico ao longo o último ano de simulação, com e sem pluviosidade incidente. ....	163
Anexo F – Figura 21 – PD1 – Humidade relativa na face exterior do pano interior de alvenaria ao longo do último ano de simulação, com e sem pluviosidade incidente .....	164
Anexo F – Figura 22 – PD2 – Humidade relativa na face exterior do isolamento térmico ao longo do último ano de simulação, com e sem pluviosidade incidente .....	164
Anexo F – Figura 23 – PD2a – Humidade relativa na face interior do isolamento térmico ao longo do último ano de simulação com e sem pluviosidade incidente .....	165
Anexo F – Figura 24 – PD3 – Humidade relativa na face exterior do isolamento térmico ao longo do último ano de simulação com e sem pluviosidade incidente .....	165
Anexo F – Figura 25 – PD3a – Humidade relativa na face interior do isolamento térmico ao longo do último ano de simulação, com e sem pluviosidade incidente .....	166
Anexo F – Figura 26 – PS4 – Humidade relativa na face exterior do isolamento térmico ao longo do último ano de simulação, com e sem pluviosidade incidente .....	166
Anexo F – Figura 27 – PS5 – Humidade relativa na face exterior do isolamento térmico ao longo do último ano de simulação, com e sem pluviosidade incidente .....	167
Anexo F – Figura 28 – PS6 – Humidade relativa na face exterior do isolamento térmico ao longo do último ano de simulação, com e sem pluviosidade incidente .....	167

## SIMBOLOGIA

A - Coeficiente de absorção de água ( $\text{kg/m}^2 \cdot \sqrt{\text{s}}$ )

$a_s$  – Coeficiente de absorção de radiação solar de onda curta (-)

b - Factor de aproximação da *curva de armazenamento de humidade* (-)

b - Suplemento de condutibilidade térmica ( $\%/M \cdot \%$ )

C - Quantidade total de precipitação ( $\text{L/m}^2 \cdot \text{h}$ )

$C_i$  - Quantidade de precipitação incidente no paramento da parede ( $\text{L/m}^2 \cdot \text{h}$ )

c – Calor específico ( $\text{J/kg} \cdot \text{K}$ )

$D_w$  - Coeficiente de transferência de água líquida ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$D_{ws}$  - Coeficiente de transferência de água líquida por sucção ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$D_{ww}$  - Coeficiente de transferência de água líquida por redistribuição ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$D_\varphi$  - Coeficiente de condução de água líquida ( $\text{kg/m} \cdot \text{s}$ )

e - Espessura da camada (m)

$g_v$  - Fluxo de vapor ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ )

$g_w$  – Fluxo de água líquida ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ )

$h_{\text{conv}}$  - Condutância térmica superficial exterior por convecção ( $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ )

$h_{\text{ext}}$  - Condutância térmica superficial exterior ( $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ )

$h_{\text{rad}}$  - Condutância térmica superficial exterior por radiação ( $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ )

Hr ou  $\varphi$  - Humidade relativa (adimensional ou %)

$h_v$  – Calor latente com mudança de fase ( $\text{J/kg}$ )

I - Radiação solar vertical relativamente à superfície ( $\text{W/m}^2$ )

Kn - Factor de Knudsen (-)

L - Caminho livre médio da molécula de água (m)

m - Massa da amostra (kg)

$N_a$  – humidade absoluta exterior ( $\text{kg/m}^3$ )

$N_i$  – humidade absoluta interior ( $\text{kg/m}^3$ )

$P_e$  – Pressão do ambiente exterior (Pa)

$P_i$  – Pressão do ambiente interior (Pa)

$P_L$  - Pressão do ar ambiente (Pa)

$P_p$  - Pressão parcial de vapor (Pa)

$P_{\text{sat}}$  - Pressão de saturação do vapor de água (Pa)

$P_{\text{se}}$  – Pressão parcial de vapor de água à superfície (Pa)

$q$  - Fluxo de calor por unidade de superfície ( $\text{W/m}^2$ )

$q_{\text{solar}}$  - Fluxo de calor proveniente da radiação solar ( $\text{W/m}^2$ )

$r$  - Raio do poro (m)

$R_T$  - Resistência térmica ( $\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$ )

$R_D$  – Resistência à difusão de vapor de água ( $\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa/Kg}$ )

$R_1$  – Coeficiente de chuva incidente (-)

$R_2$  - Coeficiente de chuva incidente (s/m)

$R_{\text{H}_2\text{O}}$  - Constante dos gases para o vapor de água  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

$s$  - Pressão de sucção (Pa)

$S_d$  - Espessura de camada de ar de difusão equivalente (m)

$T$  - Temperatura (K ou  $^{\circ}\text{C}$ )

$T_e$  – Temperatura do ambiente exterior

$T_i$  – Temperatura do ambiente interior

$T_{\text{se}}$  – Temperatura superficial exterior

$T_{\text{si}}$  – Temperatura superficial interior

$U$  – coeficiente de transmissão térmica da parede ( $\text{W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ )

$V$  - Velocidade do vento (m/s)

$V_{\text{real}}$  - Volume real da amostra (m<sup>3</sup>)

$V_{\text{total}}$  - Volume total da amostra (m<sup>3</sup>)

$V_{\text{porosidade}}$  - Volume dos poros (m<sup>3</sup>)

$w$  – Teor de humidade (kg/m<sup>3</sup>)

$w(\varphi)$  - Teor de humidade em função da humidade relativa (kg/m<sup>3</sup>)

$w_f$  – *Free saturation* (kg/m<sup>3</sup>)

$w_{\text{max}}$  - Teor de humidade máximo (kg/m<sup>3</sup>)

$w_{80}$  - Teor de humidade de referência (kg/m<sup>3</sup>)

$w_s$  – limite de saturação (kg/m<sup>3</sup>)

$\beta_p$  – Coeficiente de transferência de vapor de água (kg/m<sup>2</sup>.s.Pa)

$\Delta P$  - Variação de pressão (Pa)

$\Delta T$  – Variação de temperatura (°C ou K)

$\Delta v$  - Variação de humidade absoluta (kg/m<sup>3</sup>)

$\theta$  - Ângulo de contacto (°)

$\theta_a$  – Temperatura média mensal exterior (°C)

$\varphi_a$  – Humidade relativa média mensal exterior ( adimensional ou %)

$\delta$  - Permeabilidade ao vapor de água (kg/m<sup>2</sup>.s.Pa)

$\delta N$  – suplemento de humidade (kg/m<sup>3</sup>)

$\lambda$  - Condutibilidade térmica do material de construção húmido (W/m·K)

$\lambda(w)$  - Condutibilidade térmica do material húmido (W/m·K)

$\lambda_0$  - Condutibilidade térmica do material seco (W/m·K)

$\mu$  - Factor de resistência à difusão de vapor (-)

$\rho$  - Massa volúmica do material (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_{\text{true}}$  - Massa específica do material ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_{\text{bulk}}$  - Massa volúmica do material seco ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_w$  - Massa volúmica da água ( $\text{kg/m}^3$ )

$\tau$  - Tensão superficial da água ( $\text{N/m}$ )

$\sigma$  – constante de Stefan-Boltzmann ( $\text{W/m}^2.\text{K}^4$ )

$R_{\text{se}}$  - resistência térmica superficial exterior ( $\text{m}^2.\text{°C/W}$ )

$R_{\text{si}}$  - resistência térmica superficial interior ( $\text{m}^2.\text{°C/W}$ )

## **Siglas e Acrónimos**

EPS – Poliestireno expandido moldado

MW – Lã mineral

PUR – Espuma rígida de poliuretano

XPS – Poliestireno expandido extrudido

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Motivação e enquadramento do tema

A ocorrência de condensações internas nos elementos construtivos origina a presença de água no estado líquido não esperada, o que pode promover diferentes formas de degradação de uma gravidade variável dos materiais, dependendo das suas características (Henriques *et al.*, 2003). Deste modo, é importante ter o conhecimento da complexidade dos fenómenos físicos envolvidos no processo de condensação, bem como a influência de outras variáveis climatéricas no comportamento higrotérmico da solução construtiva. Em 2007, o número de modelos de simulação higrotérmica era de 57, de acordo com o Departamento de Energia dos Estados Unidos da América, sendo na sua maioria baseados no regime variável (Ramos *et al.*, 2009). Os modelos considerados na presente dissertação são o método de Glaser e as simulações numéricas em regime variável realizadas através de um *software* desenvolvido pelo Fraunhofer Institute of Building Physics (wufi pro, 1999).

O método de Glaser é uma forma simplificada de tratar o transporte de humidade e calor nos elementos construtivos, baseada na determinação da pressão de vapor de água ao longo do elemento construtivo, decorrente apenas da difusão de vapor. Trata-se de uma metodologia mais expedita que os cálculos em regime variável, que possuem uma abordagem mais completa e de acordo com a realidade, o que traz consigo um conjunto mais vasto de variáveis e de conhecimentos necessários à sua utilização. O WUFI utiliza na sua metodologia de cálculo uma variação horária da humidade relativa e temperatura do ambiente exterior, a ocorrência de pluviosidade e a humidade inicial dos materiais.

## 1.2. Objectivos

A presente dissertação tem como objectivo a análise de diferentes parâmetros no transporte de calor e humidade em regime variável (orientação, tonalidade do revestimento, espessura da alvenaria, tipos de ambiente interior), e a posterior avaliação do risco de ocorrência de condensações internas em soluções construtivas de parede de utilização corrente em Portugal, para o clima de Lisboa. Os resultados obtidos pelo WUFI serão posteriormente comparados com a aplicação do método de Glaser às mesmas soluções construtivas, permitindo uma análise comparativa entre o modelo numérico de regime variável e o modelo que se aplica ao regime estacionário. O método de Glaser é também utilizado para determinar a variação mensal da temperatura nas interfaces de uma solução construtiva com isolamento térmico colocado pelo interior e outra com isolamento pelo exterior, para

determinar o risco de ocorrência de condensação resultante do posicionamento desta camada.

Realiza-se também uma análise da alteração entre diferentes tipos de isolamento térmico numa mesma solução construtiva de parede, e posteriormente uma análise do mesmo tipo de isolamento térmico em diferentes soluções construtivas, no sentido de avaliar o teor de humidade a que estão sujeitos.

### **1.3. Plano de trabalho**

A distribuição dos capítulos da presente dissertação pretende constituir uma sequência lógica do estudo do comportamento higrotérmico dos edifícios. Inicialmente é apresentada a fundamentação teórica correspondente aos regimes de transporte de humidade e calor estudados, pelo Método de Glaser e pelo WUFI. Finalmente são abordadas um conjunto de regras de origem francesa no sentido de evitar a ocorrência de condensações internas. Na segunda parte são enunciados os tipos de simulações realizadas e a análise dos diferentes resultados obtidos.

A dissertação está dividida em 4 capítulos que são descritos seguidamente:

- No capítulo 1 é realizada uma introdução geral ao tema abordado, onde este é enquadrado, são definidos os objectivos do trabalho, e são descritos os vários capítulos da dissertação;
- No capítulo 2 trata-se o comportamento do ar húmido, os parâmetros que o definem, e a origem do fenómeno de condensações em estudo e é descrito o método de Glaser e as suas simplificações e limitações. Define-se o transporte de calor e humidade em regime variável, a sua fundamentação teórica, o programa de cálculo WUFI Pro, o seu funcionamento e os parâmetros necessários à definição das simulações higrotérmicas. É realizada uma abordagem a um conjunto de regras de concepção de paredes, no sentido de evitar a ocorrência de condensações internas.
- No capítulo 3 estuda-se o efeito da orientação, da tonalidade, da espessura do pano de alvenaria e das normas que definem o ambiente interior na humidade relativa encontrada numa solução de parede simples sem isolamento térmico. São simuladas um conjunto de 12 soluções construtivas que servem de base para um estudo sobre o risco de ocorrência de condensações internas e um comparativo entre regime estacionário e regime dinâmico. É realizada uma análise das temperaturas na interface de uma solução construtiva com alteração de posicionamento do isolamento térmico, e do risco de ocorrência de condensação associado às



diferenças de pressão. Por fim, é analisado o teor de humidade dos materiais de isolamento térmico.

- No capítulo 4 são abordadas as principais conclusões do estudo realizado e propostas sugestões para trabalhos futuros no âmbito deste tema.

**Análise Comparativa de Diferentes Modelos de Simulação Numérica na  
Avaliação da Ocorrência de Condensações Internas**

## 2. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA OCORRÊNCIA DE CONDENSAÇÕES INTERNAS EM PAREDES

### 2.1. Comportamento do ar húmido

O ar tem um limite para o qual não consegue armazenar mais vapor de água, que varia de acordo com a temperatura. Para uma temperatura mais elevada, maior será a quantidade de vapor de água que o ar consegue conter, e uma temperatura menor implica uma diminuição da capacidade do ar em armazenar vapor de água (Henriques, 1995).

Designa-se por teor de humidade,  $w$ , a quantidade de vapor de água que o ar contém, expressa em  $\text{kg/m}^3$  ou  $\text{kg/kg}$ . Quando, para uma determinada temperatura, o ar não tem capacidade para conter mais vapor de água, ocorre a condensação do excesso de humidade absoluta. Este limite é chamado de limite de saturação,  $w_s$ .

A pressão exercida pelo vapor de água é designada por pressão parcial,  $P_p$ , em Pa. Quando o ar está sujeito a uma pressão de vapor correspondente ao seu limite de saturação designa-se por pressão de saturação,  $P_{\text{sat}}$ .

A pressão de saturação é calculada pelas seguintes expressões (Henriques *et al.*, 2003):

- para  $T < 0$

$$P_{\text{sat}} = 611 \cdot e^{\left(\frac{22,44T}{272,44+T}\right)} \quad (2-1)$$

- para  $T > 0$

$$P_{\text{sat}} = 611 \cdot e^{\left(\frac{17,08T}{234,18+T}\right)} \quad (2-2)$$

onde:

$P_{\text{sat}}$  [Pa]: pressão de saturação de vapor de água

$e$  [-]: número de Neper

$T$  [°C]: temperatura

O parâmetro que falta enunciar é designado por humidade relativa,  $H_r$ . Este parâmetro é definido como o quociente entre o teor de humidade e o seu limite de saturação (equação 2-3), em percentagem, e pode também ser representado pelo quociente entre a pressão parcial de vapor e a pressão de saturação, também em percentagem. O comportamento do

ar húmido pode ser representado pelo diagrama psicrométrico (Figura 2.1) (Henriques *et al.*, 2003).

$$Hr = \frac{w}{w_s} \cdot 100 \quad (2-3)$$

onde:

Hr [%]: humidade relativa

w [kg/m<sup>3</sup>]: humidade absoluta

w<sub>s</sub> [kg/m<sup>3</sup>]: limite de saturação

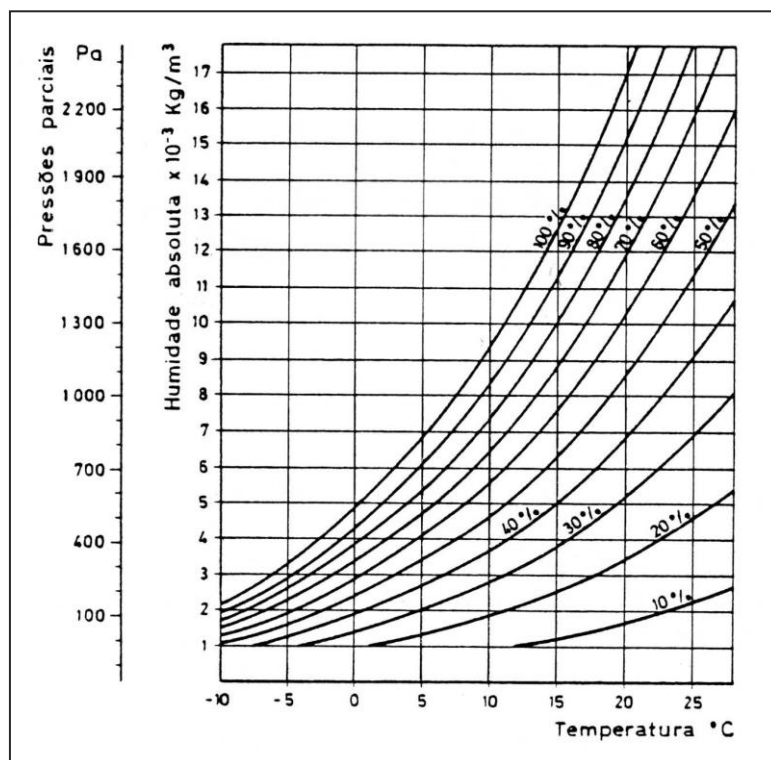


Figura 2.1- Diagrama Psicrométrico  
(Fonte: Henriques, 2003)

A título de exemplo, considerando uma massa de ar com a temperatura de 25°C e uma humidade relativa de 80%, caso a temperatura desta massa de ar arrefeça até uma temperatura de 10° o ar atingirá a saturação e haverá condensação de vapor de água na quantidade correspondente à subtracção da humidade absoluta inicial (18kg/m<sup>3</sup>) com a final (aprox. 9,5kg/m<sup>3</sup>).

## 2.2. Condensações internas

As condensações internas nos elementos construtivos dependem, em grande medida, do comportamento do ar húmido abordado no presente capítulo. Quando ocorre difusão de vapor de água pela parede, caso a pressão parcial num determinado ponto iguale a pressão de saturação para a temperatura desse ponto, ocorre a condensação do teor de humidade que excede a capacidade do ar em conter vapor de água.

A ocorrência de condensações internas nos elementos construtivos produz um aumento da sua condutibilidade térmica (Henriques, 1995), e a consequente diminuição da resistência térmica das soluções construtivas onde estão inseridos.

Existem duas possíveis abordagens na avaliação do risco de ocorrência de condensações internas em elementos construtivos, os métodos que se baseiam no regime permanente - método de Glaser, e o método que é baseado na transferência de calor e humidade em regime variável – WUFI Pro 4.2.

## 2.3. Avaliação em regime estacionário pelo Método de Glaser

O método de Glaser é um método de cálculo simplificado relativamente aos processos mais avançados e que exigem a o conhecimento e a aplicação de um conjunto mais alargado de mecanismos de transferência de humidade nos materiais. O método de Glaser está na base de uma norma europeia que serve de base para a análise de ocorrência de condensações internas em regime estacionário, tendo em conta apenas a humidade de condensação superficial e interna. Deste modo, são deixados de parte outros tipos de humidade que possam ocorrer num elemento construtivo, como a ascensão de humidade do terreno, a humidade da precipitação incidente na fachada, a humidade de construção e o transporte de humidade por convecção (EN 13788, 2001).

Esta metodologia possui um conjunto de simplificações que lhe proporcionam um carácter de utilização mais prático e menos abrangente do ponto de vista higrotérmico, sendo que assume o seguinte conjunto de pressupostos no seu cálculo (EN13788, 2001):

- Não existe uma dependência da condutibilidade térmica relativamente à humidade relativa;
- Não ocorre absorção e libertação do calor latente de evaporação ou condensação, quando há mudança de fase da água;
- As propriedades dos materiais não variam com o teor de humidade;
- Não ocorre absorção por capilaridade nem transporte de água no estado líquido;

- Não existe movimento de ar através de fendas ou espaços de ar;
- Os materiais não possuem capacidade higroscópica;

Os parâmetros dos materiais que são necessários ao método de Glaser são: o factor de resistência à difusão de vapor,  $\mu$ , a permeabilidade ao vapor de água,  $\delta$ , a condutibilidade térmica,  $\lambda$ , e a espessura da camada,  $e$ . Estes parâmetros e alguns dos fenómenos que ocorrem em regime variável serão tratados no sub-capítulo 2.4.3.

A metodologia de cálculo deste método baseia-se no conhecimento das temperaturas do ambiente exterior e interior, a partir das quais se determinam as temperaturas superficiais das faces interior e exterior da parede, com o conhecimento prévio do coeficiente de transmissão térmica,  $U$ , em  $W/m^2 \cdot ^\circ C$ . As expressões que determinam as temperaturas superficiais são as seguintes (Henriques, 1995):

$$T_{se} = T_e + \left(\frac{1}{h_i}\right) \cdot U \cdot (T_i - T_e) \quad (2-4)$$

$$T_{si} = T_i - \left(\frac{1}{h_e}\right) \cdot U \cdot (T_i - T_e) \quad (2-5)$$

onde:

$T_{si}$  [ $^\circ C$ ]: temperatura superficial interior

$T_{se}$  [ $^\circ C$ ]: temperatura superficial exterior

$T_i$  [ $^\circ C$ ]: temperatura ambiente interior

$T_e$  [ $^\circ C$ ]: temperatura ambiente exterior

$U$  [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]: coeficiente de transmissão térmica da parede

$\left(\frac{1}{h_e}\right)$  [ $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ]: resistência térmica superficial exterior

$\left(\frac{1}{h_i}\right)$  [ $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ]: resistência térmica superficial interior

Os valores da resistência térmica superficial do interior e exterior são retirados da norma europeia EN ISO13788, e tomam os valores que constam da Tabela 2.1.

**Tabela 2.1 – Resistência térmica superficial**  
(Adaptado de: EN 13788, 2001)

	Resistência ( $\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$ )
Resistência térmica superficial exterior, $R_{se}$	0,04
Resistência térmica superficial interior, $R_{si}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>• em vidros e caixilharia</li> <li>• nas restantes superfícies internas</li> </ul>	0,13 0,25 <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> este valor representa o pior caso de risco de condensação num canto interior

Considere-se uma parede heterogénea, composta por  $n$  materiais. A determinação das temperaturas nas interfaces entre os materiais constituintes da parede é realizada, com base na Lei de Fourier, assumindo que o regime é estacionário:

$$q = \frac{1}{\sum \frac{e_j}{\lambda_j}} (T_i - T_e) \quad (2-6)$$

onde:

$q$  [ $\text{W/m}^2$ ]: Fluxo de calor por unidade de superfície

$\lambda_j$  [ $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ]: Condutibilidade térmica da camada  $j$

$T_i$  [ $^\circ\text{C}$ ]: temperatura do ambiente interior

$T_e$  [ $^\circ\text{C}$ ]: temperatura do ambiente exterior

$e_j$  [m]: espessura da camada  $j$

Dado que o fluxo de calor é o mesmo em cada interface, e o valor de fluxo de calor global de todas as camadas corresponde também ao mesmo valor, iguala-se a expressão correspondente a cada camada, e determinam-se as temperaturas de cada interface:

$$q = \frac{T_i - T_1}{\frac{e_1}{\lambda_1}} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{e_2}{\lambda_2}} = \dots = \frac{T_n - T_e}{\frac{e_n}{\lambda_n}} = \frac{T_i - T_e}{\Sigma R_T} \quad (2-7)$$

Na equação 2-7, o termo  $\Sigma R_T$  corresponde à resistência térmica total da parede e os quocientes  $e_n/\lambda_n$  correspondem à resistência térmica de cada camada. Sabendo as temperaturas nas interfaces, podem ser determinadas as pressões de saturação correspondentes a cada temperatura através da equação 2-2 (Henriques, 2003).

A determinação das pressões parciais nas interfaces entre as camadas é determinada, considerando que o fluxo de vapor de água é também constante, com base na Lei de Fick:

$$g_v = \frac{1}{\sum \frac{e_j}{\delta_j}} (P_i - P_e) \quad (2-8)$$

$g_v$  [kg/m<sup>2</sup>.s]: Fluxo de vapor de água

$\delta_j$  [kg/m<sup>2</sup>.s.Pa]: Permeabilidade ao vapor de água da camada  $j$

$P_i$  [Pa]: Pressão do ambiente interior

$P_e$  [Pa]: Pressão do ambiente exterior

$e_j$  [m]: espessura da camada  $j$

Para determinar as pressões parciais em cada interface é utilizado um raciocínio análogo ao da equação 2-7. Sendo o fluxo de vapor global o mesmo que se verifica em cada interface do elemento construtivo, podem igualar-se as expressões correspondentes a cada camada:

$$g = \frac{P_i - P_1}{\frac{e_1}{\delta_1}} = \frac{P_1 - P_2}{\frac{e_2}{\delta_2}} = \dots = \frac{P_n - P_e}{\frac{e_n}{\delta_n}} = \frac{P_i - P_e}{\Sigma R_D} \quad (2-9)$$

Na equação 2-9, o termo  $\Sigma R_D$  tem correspondência com a resistência total à difusão de vapor da parede e o quociente,  $e_n/\delta_n$ , constitui a resistência à difusão de cada camada (Henriques, 2003).

Resultam, deste modo, uma linha correspondente às pressões de saturação e outra que representa as pressões parciais. Se, em algum caso, as pressões parciais igualarem ou excederem as pressões de saturação, verifica-se a ocorrência de condensações internas ou superficiais, caso ocorram nas faces da parede.

As espessuras podem ser representadas com a espessura real ou com uma espessura de camada de difusão de ar equivalente,  $S_d$ , ou seja, uma espessura de camada de ar que possua a mesma permeância,  $\delta/e$ , que a espessura do material utilizado. Esta alteração provoca uma diferença na representação da linha das pressões parciais, que passa a ser uma linha contínua que atravessa todas as interfaces (Henriques, 2011).

A diferença de pressão entre a pressão de saturação e a pressão parcial,  $\Delta P$ , representa a ocorrência de condensações quando a pressão parcial de vapor de água iguala ou excede a pressão de saturação, o que resulta num valor nulo ou negativo.

$$\Delta P = P_{sat} - P_p \quad (2-10)$$



As simplificações referidas anteriormente dão origem a um conjunto de fontes de erro (EN 13788, 2001):

- A condutibilidade térmica não possui uma dependência do teor de humidade do material, e não há libertação ou absorção de calor dependendo da ocorrência de fenómenos de condensação ou evaporação, respectivamente. A ocorrência destes fenómenos altera as temperaturas ao longo do elemento construtivo, o que altera por sua vez as pressões de saturação e, por consequência, a quantidade de condensação ou evaporação que ocorre no elemento construtivo;
- A utilização de propriedades constantes nos materiais é uma aproximação;
- A sucção capilar e a transferência de água líquida altera a distribuição de humidade nos elementos construtivos;
- Os movimentos de ar através de fendas ou em espaços de ar podem alterar a distribuição de humidade por convecção, condições que podem também ser alteradas pela pluviosidade;
- As condições que ocorrem na fronteira do elemento construtivo não são, na realidade, constantes ao longo de um período mensal;
- A maioria dos materiais possui higroscopicidade, o que permite a ocorrência de adsorção de vapor de água, abordada em 2.4.3.3;
- É assumida a transferência de calor e humidade unidirecional;
- Não são considerados os efeitos da radiação solar e da radiação de onda longa emitida pelas superfícies.

## **2.4. Avaliação em regime variável a partir do WUFI Pro 4.2 IBP**

O programa de cálculo numérico utilizado na presente dissertação foi desenvolvido na Alemanha pelo Fraunhofer Institute in Building Physics, e constitui um importante instrumento de cálculo do transporte de calor e humidade em elementos construtivos, em regime variável.

O modelo utilizado pelo *software* é regido pela norma europeia EN15026 - “*Hygrothermal Performance of building components and building elements – Assessment of moisture transfer by numerical simulation*”. Trata-se de uma norma que regula a aplicação prática das simulações higrotérmicas em regime variável (EN15026, 2004).

Em seguida são apresentados os fenómenos considerados por este regime e pelo programa de cálculo numérico, os parâmetros que é necessário definir, e o funcionamento do *software*.

### 2.4.1. Transporte de calor e humidade em regime variável

Existem vários processos higrotérmicos que ocorrem numa parede em contacto com o ambiente exterior. Os processos de transferência de calor e humidade são os seguintes (Kunzel, 2005):

#### Transferência de Calor

- Radiação Solar (directa e difusa);
- Emissão de onda-longa;
- Convecção;
- Calor latente de evaporação e condensação;
- Condução.

#### Transferência de Humidade

- Difusão de vapor;
- Transporte de água no estado líquido.

Na Figura 2.2, estão representados os fenómenos referidos, e a sua importância no contexto das paredes. Os fenómenos mais influentes são a radiação solar, as trocas de calor por condução e a difusão de vapor de água. Existem alternâncias na direcção em que ocorrem, sendo que o facto de ser dia/noite, ou Verão/Inverno altera o comportamento higrotérmico dos elementos construtivos.

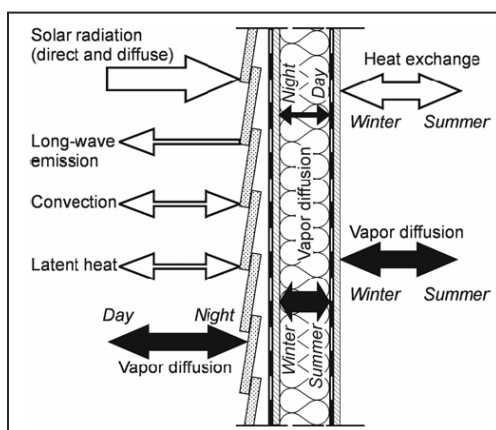


Figura 2.2 – Representação esquemática dos mecanismos de transporte higrotérmicos  
(Adaptado de: Kunzel, 2005)

Os modelos de simulação higrotérmica incluídos na norma europeia EN 15026 partilham das seguintes considerações:

- A geometria é constante, não ocorre dilatação nem retracção do material;

- Não existe reacção química e o calor de adsorção é desprezável;
- Não existe alteração das propriedades dos materiais por danos ou devido ao passar do tempo;
- Há equilíbrio local entre água líquida e vapor, sem ocorrência de histerese (diferença de comportamento entre as fases de adsorção e desadsorção de um material higroscópico (Henriques, 2011));
- A dependência da *curva de armazenamento de humidade* com a temperatura é desprezável;
- Apenas a pressão parcial de vapor é utilizada no cálculo da difusão de vapor de água, a influência adicional da temperatura e dos gradientes de pressão do ar são desprezáveis;
- Não é considerada a formação de gelo;
- O transporte de calor e humidade é unidirecional.

#### 2.4.2. Equações de transporte de calor e humidade em regime variável

No modelo numérico em regime variável, estudado na presente dissertação, são considerados apenas os mecanismos de transferência de calor por meio de condução e devido à mudança de fase da água (evaporação/condensação), não sendo consideradas as trocas de calor por convecção do vapor de água e da água líquida, nem as mudanças de entalpia baseadas no fluxo de água líquida, que possuem um efeito negligenciável no balanço térmico (Kunzel, 2008). As equações diferenciais que definem o modelo são as seguintes:

$$\frac{dH}{dT} \cdot \frac{dT}{dt} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + h_v \nabla \cdot (\delta_p \nabla (\varphi p_{sat})) \quad (2-11)$$

$$\frac{dw}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} = \nabla \cdot (D_\varphi \nabla \varphi + \delta_p \nabla (\varphi p_{sat})) \quad (2-12)$$

onde:

$\frac{dH}{dT}$  [J/m<sup>3</sup>K]: derivada da entalpia em ordem à temperatura - capacidade de armazenamento de calor do material de construção húmido

$\frac{dw}{d\varphi}$  [kg/m<sup>3</sup>]: derivada do teor de humidade em ordem à humidade relativa - capacidade de armazenamento de humidade do material de construção

$\lambda$  [W/mK]: condutibilidade térmica do material de construção húmido

$D_\varphi$  [kg/ms]: coeficiente de condução de água líquida

$\delta_p$  [kg/msPa]: permeabilidade ao vapor de água do material de construção

$h_v$  [J/kg]: calor latente com mudança de fase

$p_{sat}$  [Pa]: pressão de saturação do vapor de água

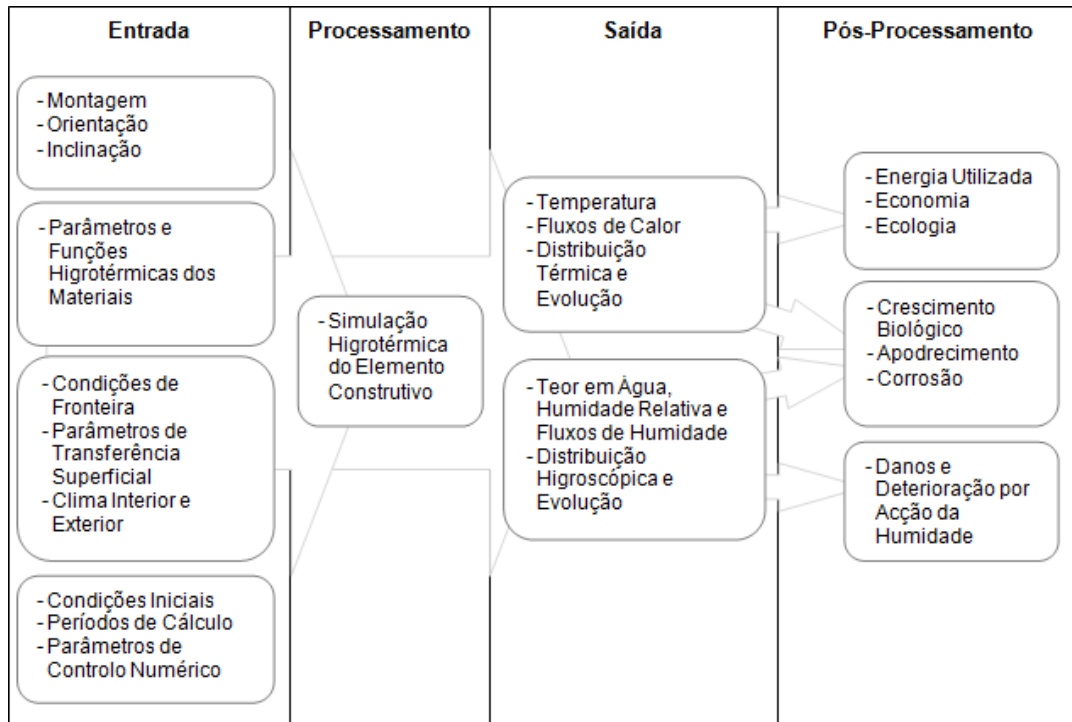
$T$  [°C]: temperatura

$\phi$  [-]: humidade relativa

Nos membros à esquerda de ambas as equações estão definidas as capacidades de armazenamento de calor e humidade do material húmido, e nos membros à direita verifica-se uma influência do calor e da humidade, que ocorre no fluxo de calor por condução e no fluxo de calor por mudança de fase. O fluxo de água líquida não depende muito da temperatura, que apenas influencia a viscosidade do líquido, consequentemente influenciando o coeficiente de transporte de água líquida  $D_\phi$ . A difusão de vapor de água é dominada simultaneamente pela temperatura e pela humidade, como ocorre na determinação da pressão de saturação do vapor de água presente na equação 2-2 (Karagiozis *et al.*, 2001).

#### 2.4.3. Parâmetros e opções do software

O processamento do WUFI pode ser representado por um fluxograma que apresenta as entradas necessárias ao cálculo do comportamento higrotérmico de uma determinada solução construtiva, e as possíveis análises que podem ser realizadas a partir dos resultados higrotérmicos que se obtém. Um esquema que resume o processo de análise do WUFI está representado na Figura 2.3.



**Figura 2.3 – Esquema representativo dos dados, resultados e interpretações possíveis das simulações higrótérmicas**  
(Adaptado de: EN15026, 2004)

O processo de utilização do WUFI inicia-se com a definição da solução construtiva, que materiais a compõem, a sua orientação e inclinação, bem como a altura a que a parede se encontra. Os parâmetros e funções higrótérmicas dos materiais vêm incluídos nas opções de cada material, a altura a que se encontra a parede e a sua orientação definem a pluviosidade incidente na fachada.

As condições de fronteira da parede exigem a escolha de vários coeficientes de transferência superficial, para definir os fenómenos que ocorrem entre o elemento construtivo e a sua envolvente, como a absorção de pluviosidade e radiação solar, a emissão de radiação de onda longa e a as resistências térmicas superficiais que influenciam as trocas de calor por condução.

Os climas do exterior e do interior podem ser definidos a partir de um conjunto de normas, curvas sinusoidais, ou da escolha de um ficheiro climático. Na parte final são escolhidas as condições iniciais do elemento construtivo, a sua humidade e temperaturas iniciais, e a definição dos períodos de simulação a realizar, bem como a escolha de determinados parâmetros numéricos, que podem detalhar ou simplificar o cálculo que se pretende efectuar.

Após a realização da simulação obtém-se um conjunto de resultados relativos à temperatura e humidade no elemento construtivo. Serão abordadas as opções possíveis de visualização dos resultados.

#### 2.4.3.1. Discretização do elemento construtivo e posições de monitorização

Neste menu são inseridas as camadas que caracterizam a solução construtiva que se pretende analisar, é definido o nível de detalhe da grelha de cada camada e são colocadas as posições de monitorização do perfil da parede.

Na Figura 2.4 está representado o menu onde se definem as características da solução construtiva a simular. Colocam-se as camadas da parede seleccionando a opção *New Layer*, seguida da atribuição da espessura do material, na caixa acima da representação do perfil da parede.

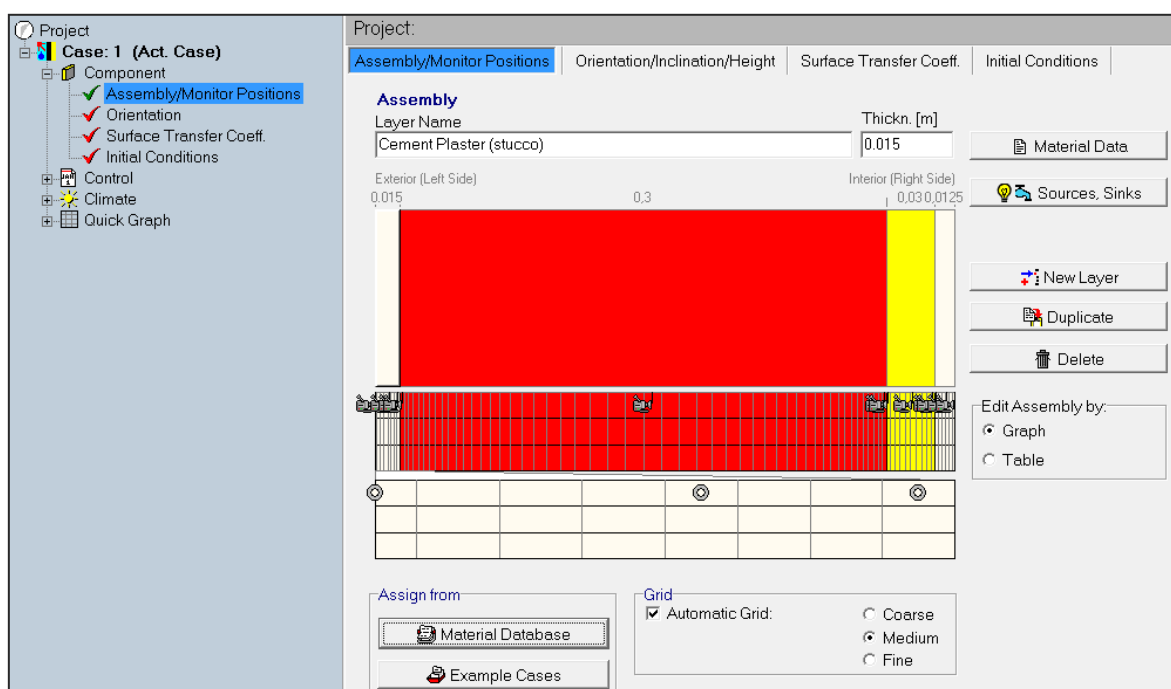
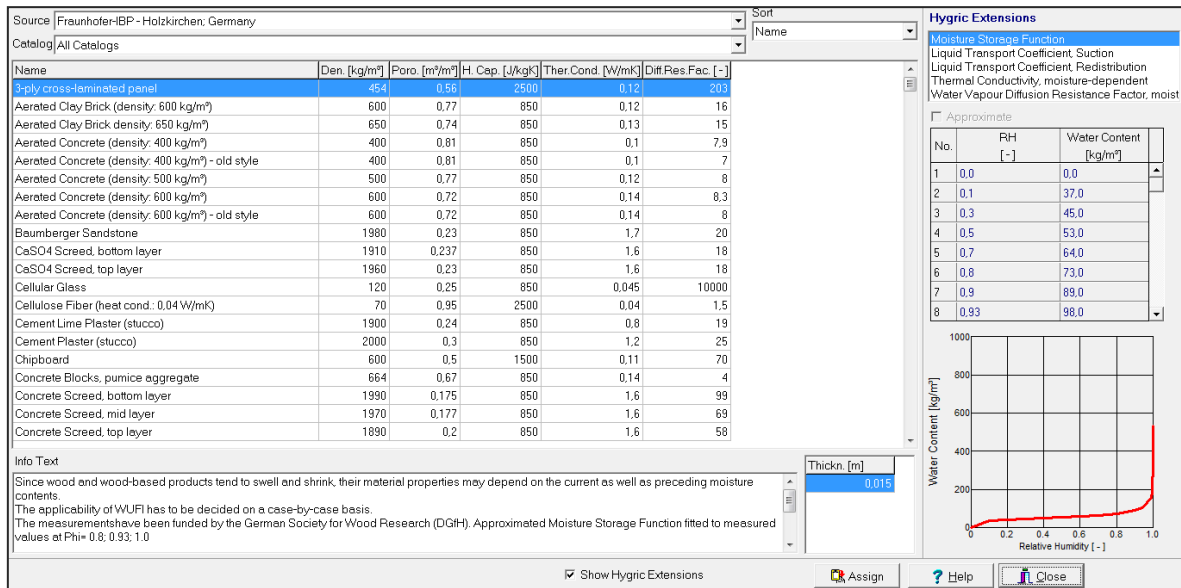


Figura 2.4 – Interface do menu de configuração e montagem do elemento construtivo (WUFI Pro)

Para definir as camadas referidas, existe uma base de dados dos materiais (Figura 2.5), realizada por estudos de diversas fontes – Fraunhofer Institute of Building Physics, Generic North American Database, LTH Lund University, NTNU Norwegian University, University of Technology Vienna - onde é possível visualizar os parâmetros básicos e adicionais de cada material, que serão abordados nos sub-capítulos 2.4.3.2 e 2.4.3.3. Esta base de dados está acessível através do botão *Material Database*.



**Figura 2.5 – Interface da base de dados dos materiais (WUFI Pro)**

Seleccionando *Automatic Grid*, na caixa abaixo do perfil da parede, é gerada uma malha que possui três níveis de detalhe: *Coarse*, *Medium* e *Fine*. A escolha faz-se de acordo com o tipo de curva que se obtém nos resultados visualizados em filme, sendo que os documentos de apoio recomendam que se faça um cálculo de teste para uma grelha *Medium* e se verifique se existem ressaltos nos perfis de temperatura, devido à baixa resolução. Deve escolher-se a grelha que permite uma boa resolução e uma menor exigência de cálculo (WUFI Help).

#### 2.4.3.2. Parâmetros básicos dos materiais

Comparativamente com o método de Glaser, abordado no subcapítulo 2.3, o WUFI necessita de uma maior quantidade de parâmetros de materiais no seu cálculo, que possuem uma maior complexidade na sua determinação e abordagem.

#### Massa volúmica

A massa volúmica é um parâmetro utilizado pelo WUFI para converter o calor específico por massa para calor específico por volume. Trata-se do quociente entre a massa,  $m$ , do material e o volume total do material,  $V_{\text{total}}$ .

$$\rho = \frac{m}{V_{\text{total}}} \quad (2-13)$$

onde:

$\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]: massa volúmica do material

$m$  [kg]: massa da amostra

$V_{\text{total}}$  [m<sup>3</sup>]: volume total da amostra

É ainda utilizado outro conceito, a massa específica do material, que contempla apenas o volume ocupado por material,  $V_{\text{real}}$ , dado pela diferença entre volume total,  $V_{\text{total}}$  e volume ocupado pelos poros,  $V_{\text{porosidade}}$  (WUFI Help).

$$\rho_{\text{true}} = \frac{m}{(V_{\text{total}} - V_{\text{porosidade}})} \quad (2-14)$$

onde:

$\rho_{\text{true}}$  [kg/m<sup>3</sup>]: massa específica do material

$m$  [kg]: massa da amostra

$V_{\text{real}}$  [m<sup>3</sup>]: volume da amostra

### **Porosidade**

A porosidade,  $n$ , representa o quociente entre o volume total e o volume de vazios do material. É através deste parâmetro que o programa determina o valor de *saturação máxima* do material,  $w_{\text{max}}$ , (equação 2-13) dado que os espaços vazios no interior dos materiais de construção são a base dos conceitos que envolvem a migração de humidade no seu interior. Assim, a porosidade pode ser expressa da seguinte forma (WUFI Help):

$$n = 1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{true}}} \quad (2-15)$$

onde:

$n$  [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]: porosidade

$\rho_{\text{true}}$  [kg/m<sup>3</sup>]: massa específica do material

$\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]: massa volúmica do material

### **Calor específico do material seco**

O calor específico,  $c$ , representa a variação térmica de um material quando recebe energia na forma de calor, sendo que existem dois tipos de calor específico, um expresso em função da massa e outro em função do volume. O WUFI recebe como parâmetro introduzido pelo utilizador o calor específico por massa, em J/kg.K e converte-o para volume, em J/m<sup>3</sup>K, multiplicando-o pela massa volúmica,  $\rho$ , determinada a partir da equação 2-13 (WUFI Help).



### **Condutibilidade térmica do material seco**

A condutibilidade térmica dos materiais utilizada no programa pode corresponder ao material seco ou ser dependente da humidade, esta última opção pode ser tomada como parâmetro adicional, como será abordado no sub-capítulo seguinte.

### **Condutibilidade térmica em função do teor de humidade**

Caso seja tomada a opção de utilizar uma condutibilidade térmica dependente do teor de humidade do material, o programa gera uma tabela com o valor de percentagem de condutibilidade térmica induzida pela humidade, pela expressão seguinte:

$$\lambda(w) = \lambda_0 \left( 1 + b \frac{w}{\rho_{\text{bulk}}} \right) \quad (2-16)$$

onde:

$\lambda(w)$  [W/m.K]: condutibilidade térmica do material húmido

$\lambda_0$  [W/m.K]: condutibilidade térmica do material seco

$\rho_{\text{bulk}}$  [kg/m<sup>3</sup>]: massa volúmica do material seco

$b$  [%/M.-%]: suplemento de condutibilidade térmica

O valor do suplemento depende do material, no entanto, em materiais higroscópicos é independente da massa volúmica. Em materiais de isolamento orgânico não há uma relação linear entre a condutibilidade térmica e o teor de humidade do material.

Ao utilizar uma condutibilidade dependente do teor de humidade deve assegurar-se que o valor correspondente a um teor de humidade nulo é o valor de condutibilidade térmica do material seco. Caso contrário, o efeito do teor de humidade seria considerado a duplicar. Se a investigação não se centrar especificamente no fluxo de calor, diferenças entre valores de condutibilidade térmica podem ser ignoradas, dado que as simulações higrótérmicas não dependem de valores precisos para este parâmetro (WUFI Help).

### **Factor de resistência à difusão de vapor**

O factor de resistência à difusão,  $\mu$ , define a maior ou menor dificuldade com que um material se deixa atravessar pelo vapor de água, comparativamente à resistência do ar parado à difusão de vapor de água. Pode ser considerada uma dependência do teor de humidade do material.(WUFI Help).

### Factor de resistência à difusão de vapor de água em função do teor de humidade

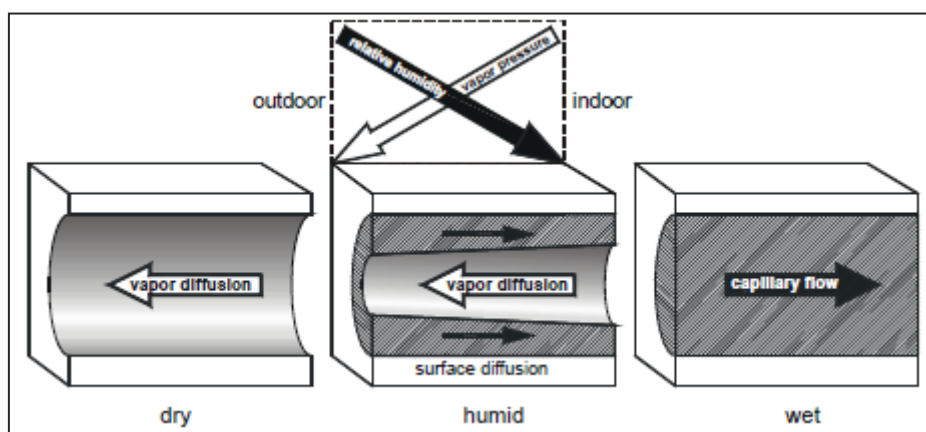
O factor de resistência ao vapor de água,  $\mu$ , dependente do teor de humidade do material, é gerado pelo WUFI por meio de uma tabela interpolada linearmente.

Caso não seja utilizado um factor dependente do teor de humidade, o programa vai tratá-lo como tal para valores superiores à *free saturation*,  $w_f$ , ocorrendo uma redução do factor até ao ponto em que os capilares estão cheios de água,  $w_{max}$ , que corresponde a um valor nulo para o qual já não há contribuição dos capilares para o transporte de vapor de água. Estes termos aqui enunciados são explicados em maior detalhe no sub-capítulo seguinte.

Em materiais minerais o decréscimo fictício do factor  $\mu$  com o aumento do teor de humidade deve-se à difusão de superfície e pode ser incluído na região capilar (WUFI Help).

#### **2.4.3.3. Parâmetros adicionais dos materiais**

Para além dos parâmetros básicos já mencionados, o WUFI necessita de parâmetros adicionais que considerem os vários mecanismos de transporte de humidade em materiais porosos. Estes mecanismos podem ser representados pela Figura 2.6, onde se considera o poro de um material num período de Inverno, em que a pressão parcial de vapor é elevada no interior e mais baixa no exterior, sendo que também existe uma humidade relativa mais baixa no lado interior que no exterior.



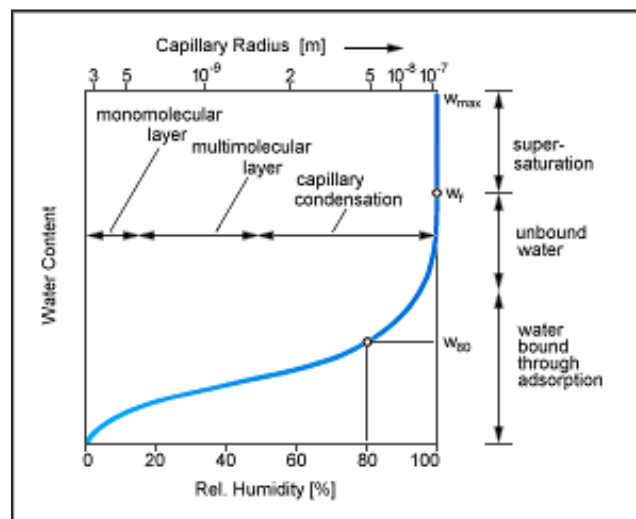
**Figura 2.6 – Mecanismos de transporte de humidade**  
(Fonte: Karagiozis *et al.*, 2001)

Assim, existe uma força motriz que provoca a difusão de vapor do interior para o exterior, a pressão parcial de vapor de água, e uma força motriz que provoca o humedecimento do material, a humidade relativa. Quando o material está totalmente seco, apenas ocorre difusão de vapor de água, mas como é um estado que não acontece de forma usual, a

humidade presente no interior do poro forma uma camada aderente à sua superfície, que é mais espessa no lado exterior devido ao gradiente de humidade relativa (como a humidade relativa é menor na zona interior, existem menos moléculas aderentes às faces do poro). Devido a movimentos moleculares, esta camada é transportada para o interior, constituindo a difusão superficial. Estes dois fenómenos podem contrariar-se o suficiente até uma redução substancial do transporte de humidade, e por consequência, de condensação. Caso haja molhagem do material, os poros ficam totalmente cheios de água líquida, dando origem a um transporte capilar de água, que é provocado pelas diferenças de pressão de sucção nos capilares, tratada nos sub-capítulos seguintes. A humidade relativa é também uma força motriz para o transporte de água nos capilares, dada a relação que existe entre a pressão de sucção dos capilares e a humidade relativa no poro, dada pela Lei de Kelvin (equação 2-18) (Karagiozis *et al.*, 2001).

### **Curva de armazenamento de humidade**

Um material de construção possui uma gama de teores de humidade que podem ir desde o estado completamente seco, em que o teor de humidade é nulo, até um nível de *saturação máxima*,  $w_{max}$ . A variação do teor de humidade dos materiais de construção utilizados na simulação numérica do programa é traduzida por uma curva que representa três diferentes estágios de humedecimento: *intervalo higroscópico*, *intervalo capilar* e *zona de saturação máxima* (Figura 2.7).



**Figura 2.7– Curva de armazenamento de humidade**  
(Fonte: WUFI Help)

O *intervalo higroscópico* decorre desde a fase em que o material está completamente seco ( $w=0$ ) até um teor de humidade de 95%. Entre os 95% e 100% de humidade relativa decorre

o *intervalo capilar*. Acima dos 100% ( $w_t$ ) de humidade relativa dá-se a ocorrência do fenómeno de condensação (WUFI Help).

Os procedimentos de medição que conduzem a esta leitura gráfica correspondem a ensaios de adsorção isotérmica, que consistem na determinação de valores de equilíbrio do teor de humidade do material, para diferentes valores de humidade relativa, a uma temperatura constante (Azevedo, 2011). Para um conjunto de humidades relativas, que vão desde um valor inferior a 50% e até aos 90%, o material é colocado numa câmara climática e o teor de humidade de equilíbrio com a humidade relativa imposta são determinados por pesagem da amostra (Krus, 1996). Ao atingir uma humidade relativa acima dos 95% é necessário utilizar um método de ensaio que envolve a aplicação de vácuo para retirar todo o ar aprisionado nos poros do material (WUFI Help).

### **Intervalo higroscópico**

Os materiais de construção porosos em contacto com ar que tenha algum vapor de água, vão sofrer a adesão de moléculas de água à superfície dos seus poros, num processo denominado por adsorção molecular (Henriques, 2011). As moléculas depositam-se progressivamente, com o aumento da humidade relativa, inicialmente com uma camada monomolecular que se torna plurimolecular como resultado das sucessivas camadas depositadas.

Uma maior concentração de vapor de água no interior dos poros implica uma maior taxa de moléculas de água depositadas e, por outro lado, uma temperatura elevada leva a que haja maior taxa de desadsorção, fenómeno inverso da adsorção que ocorre numa fase de redução da humidade relativa ambiente, e consequente redução do teor em água do material. Como a humidade absoluta e a temperatura têm efeitos contrários, o teor de humidade de equilíbrio é determinado pela sua taxa de variação, essencialmente pela humidade relativa no ar do poro, dado que a função que determina o teor de humidade não depende consideravelmente da temperatura (WUFI Help).

### **Intervalo capilar**

Quando, nos poros mais finos, ocorre a redução da pressão de saturação para humidades relativas entre 60 e 80% (WUFI Help), as moléculas depositadas nas faces dos poros unem-se, num processo designado por condensação capilar (Henriques, 2011).

Ao contactar com água líquida, um material higroscópico absorve água até atingir a *free saturation*,  $w_f$ , (WUFI Help) que representa o teor de humidade que pode ser absorvido, de forma natural e sem depender de forças exteriores, pelo material (Krus, 1996). Na *curva de armazenamento de humidade* este valor corresponde a 100% de humidade relativa, no entanto, devido ao facto de ainda existir ar nos poros, não significa que o material esteja no seu limite de saturação. O valor da *free saturation*,  $w_f$ , é conhecido para a maioria dos materiais e o WUFI inclui o teor de humidade de referência,  $w_{80}$ , referente a 80% de humidade relativa, na construção das curvas de armazenamento de humidade.

Quando um material húmido é colocado em contacto com outro material de construção numa parede, por exemplo, vai ocorrer um reequilíbrio do teor de humidade entre os dois materiais devido ao efeito de sucção dos capilares mais finos relativamente aos maiores. A pressão de sucção capilar é enunciada do seguinte modo (Künzel, 1995):

$$s = \frac{2 \tau \cos \theta}{r} \quad (2-17)$$

onde:

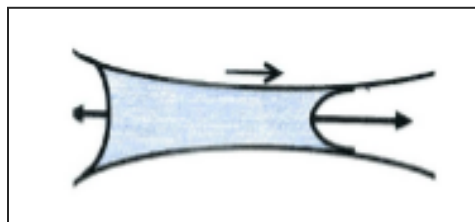
$s$  [Pa]: pressão de sucção

$\tau$  [N/m]: tensão superficial da água

$r$  [m]: raio capilar

$\theta$  [°]: ângulo de contacto

Quando os poros ainda se encontram parcialmente cheios ocorre a formação de meniscos, curvas côncavas ou convexas nas superfícies da água, devido à tensão superficial e à tensão na interface entre a água e a parede do poro. A pressão de sucção é também influenciada pelo ângulo de contacto e pelo raio do poro (Krus, 1996). A variação do ângulo de contacto faz a diferença entre haver um menisco côncavo, que provoca sucção, e um menisco convexo, que dá origem a uma libertação de água do poro (Henriques, 2011).



**Figura 2.8 - Fluxo de água líquida num poro com secção variável**  
(Fonte: Henriques, 2011)

Quando existem dois capilares com diferentes secções, o capilar mais fino determina o sentido de sucção da água (Figura 2.8), até este atingir um ponto de saturação. Nesta altura os meniscos terão um raio de curvatura semelhante (Krus, 1996).

No *intervalo capilar* a sucção dos poros é determinante para definir a humidade relativa no poro, enunciado pela Lei de Kelvin (EN15026, 2004):

$$s = \rho_w R_{H_2O} T \ln \varphi \quad (2-18)$$

que pode ser escrita na forma,

$$\varphi = e^{\left[ \frac{-s}{\rho_w R_{H_2O} T} \right]} \quad (2-19)$$

onde:

$\varphi$  [-]: humidade relativa

$s$  [Pa]: pressão de sucção

$\rho_w$  [kg/m<sup>3</sup>]: massa volúmica da água

$R_{H_2O}$  [J/kgK]: constante dos gases para o vapor de água

$T$  [K]: temperatura

### **Zona de saturação máxima**

A zona de *saturação máxima* compreende a parte da *curva de armazenamento de humidade* correspondente a 100% de humidade relativa e os valores entre  $w_f$  e  $w_{max}$ . O fenómeno de condensação capilar não consegue por si só preencher a totalidade dos vazios presentes no material, porque há uma parcela de ar que fica bloqueada pelo avanço da água nos capilares. Estes espaços de ar podem ser dissolvidos na água ou sofrer condensações causadas pela difusão de vapor de água pelo elemento construtivo, devido a um gradiente de temperatura (Henriques, 2011 e Krus, 1996).

Os materiais de isolamento são normalmente hidrófobos e possuem vapor saturado nos seus poros para o valor de  $w_f$ . A *saturação máxima* destes materiais dá-se assim que ocorram condensações. No caso dos materiais higroscópicos, onde os vazios já se encontram cheios para valores acima de  $w_f$ , a relação entre o teor de humidade e a humidade relativa pode ser determinada pela diferença entre os valores de  $w_f$  e  $w_{max}$ , dado o crescimento vertical desse troço (Krus, 1996).

### **Curva de armazenamento de humidade no WUFI**

A representação da *curva de armazenamento de humidade* no WUFI baseia-se na interpolação linear de uma tabela, onde estão associados valores de humidade relativa e de teor de humidade. Para valores mais elevados de humidade relativa, na ordem dos 100%, podem existir problemas numéricos se as medições forem muito detalhadas, dada a aproximação da função a uma recta vertical (WUFI Help).

No entanto, quando se trata da interface entre dois materiais higroscópicos, argamassa e alvenaria de tijolo, por exemplo, é importante conhecer com detalhe a curva de armazenamento das camadas com ligação directa dos seus capilares, para traduzir o transporte de água líquida. No caso de ocorrer corte capilar, nomeadamente com barreiras impermeáveis, entre duas camadas sucessivas, é dispensável uma curva tão detalhada, o que é também válido quando existe uma camada com elevado teor de humidade num curto espaço de tempo (Künzel, 1995), em camadas muito expostas à pluviosidade, um aumento repentino do teor de humidade avança mais rapidamente para a parte final da *curva de armazenamento de humidade*, dispensando detalhes na zona intermédia.

Nas suas iterações o WUFI considera a possibilidade de ocorrência de água, resultante de condensações na região de *saturação máxima*, região delimitada pelos valores de  $w_f$  e  $w_{max}$ . Nesta zona o valor de teor de humidade varia com a ocorrência de condensações ou evaporação da água e a humidade relativa toma sempre o valor de 1. Deste modo, o programa necessita de incluir na tabela uma entrada onde associa uma humidade relativa de 1,01 ao valor de *saturação máxima*,  $w_{max}$ . Este valor fictício de humidade é requerido pelas equações de transporte e permite que a cada valor de  $w$  corresponda um único valor de  $\phi$ .

### **Aproximação da curva de armazenamento de humidade**

Quando o programa executa o cálculo podem ocorrer problemas de convergência, decorrentes de variações repentinas nos gráficos da *curva de armazenamento de humidade*, o que obriga à adição de mais pontos para descrever estas regiões necessárias ao processo iterativo (WUFI Help).

Existem várias formulações propostas para aproximações (Künzel, 1995), no entanto apenas duas são utilizadas no programa.

### Aproximação para materiais higroscópicos

A primeira aproximação da *curva de armazenamento de humidade* corresponde a materiais higroscópicos e é formulada do seguinte modo:

$$w(\varphi) = w_f \frac{(b-1)\varphi}{b-\varphi} \quad (2-20)$$

onde:

$w(\varphi)$  [kg/m<sup>3</sup>]: teor de humidade em função da humidade relativa

$w_f$  [kg/m<sup>3</sup>]: *free saturation*

$\varphi$  [-]: humidade relativa

$b$  [-]: factor de aproximação

Deste modo, pode determinar-se o valor  $b$  apenas com o conhecimento do teor de humidade de referência,  $w_{80}$ , que corresponde ao teor de humidade em equilíbrio com 80% de humidade relativa, e o valor da saturação,  $w_f$ . Esta aproximação não se adapta a alguns tipos de betão como demonstra a Figura 2.9.

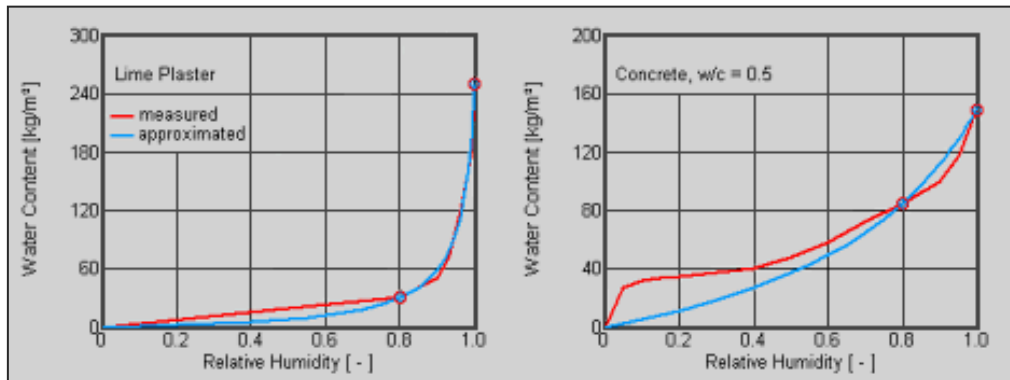


Figura 2.9 – Comparação entre curvas de armazenamento de humidade com valores medidos e aproximados pelo WUFI (Fonte: WUFI Help)

### Aproximação para materiais sintéticos

Os materiais de isolamento e as lâminas de ar apresentam valores de teor de humidade nulos para humidades relativas iguais a zero e valores entre zero e  $w_{\max}$  para 100% de humidade relativa, portanto, estes materiais não possuem uma *curva de armazenamento de humidade* definida. Nestes casos o programa aplica uma função, com valores baixos de teor de humidade, expressa do seguinte modo (WUFI Help):

$$w(\varphi) = \frac{a}{b-\varphi} + c \quad (2-21)$$



onde:

$w(\varphi)$  [kg/m<sup>3</sup>]: teor de humidade

$\varphi$  [-]: humidade relativa

Dado que o teor de humidade,  $w$ , tem de ser nulo para uma humidade relativa ( $\varphi$ ) nula, a expressão pode ser representada por:

$$c = \frac{-a}{b} \quad (2-22)$$

É assumindo um valor de 1,0105 para  $b$ .

O teor de humidade correspondente ao teor de humidade de saturação,  $w_i$ , terá de corresponder a uma humidade relativa de 100%. Para humidades acima do teor de humidade de saturação é também necessária uma correspondência entre valores, por isso, é introduzido um valor de 1,01 para a humidade relativa máxima,  $\varphi_{\max}$ , que corresponderá a um valor de teor de humidade de *saturação máxima*,  $w_{\max}$ , que é definido, como abordado em 2.4.3.2, a partir do valor da porosidade do material (WUFI Help):

$$w_{\max} = n \cdot \rho_w \quad (2-23)$$

Substituindo  $c$  na equação (2-21), tem-se:

$$w_{\max} = \frac{a}{b - \varphi_{\max}} - \frac{a}{b} \quad (2-24)$$

Resolvendo a equação em ordem a  $a$ :

$$a = w_{\max} \cdot b \cdot \frac{(b - \varphi_{\max})}{\varphi_{\max}} \quad (2-25)$$

Substituindo  $c$  na equação (2-21), resulta:

$$\frac{w(\varphi)}{w_{\max}} = \frac{\varphi}{b - \varphi} \cdot \frac{(b - \varphi_{\max})}{\varphi_{\max}} \quad (2-26)$$

Assim, é possível relacionar o teor de humidade de saturação com o teor de humidade de *saturação máxima* substituindo  $\varphi=1$ .

$$\frac{w_f}{w_{\max}} = \frac{1}{b-1} \cdot \frac{(b - \varphi_{\max})}{\varphi_{\max}} = 0,047 \quad (2-27)$$

O WUFI define, deste modo, uma relação para a zona que se encontra entre o teor de humidade de saturação e de *saturação máxima* do material:

$$w_f = 0,047 \cdot w_{\max} \quad (2-28)$$

Como demonstrado nos documentos de apoio do programa pela equação (2-21), existe uma percentagem da *saturação máxima*,  $w_{\max}$ , que define o valor de saturação,  $w_f$ . Os teores de humidade encontrados no material para valores superiores a  $w_f$  podem ser considerados como provenientes de fenómenos de condensação. A Figura 2.10 representa a aproximação feita com os cálculos anteriores.

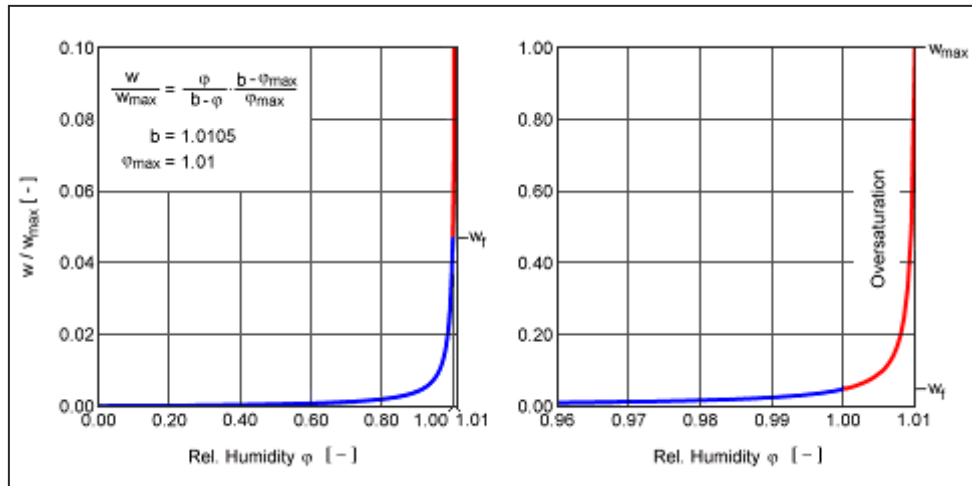


Figura 2.10 - Curva de armazenamento de humidade criada pelo WUFI para materiais artificiais  
(Fonte: WUFI Help)

#### 2.4.3.4. Difusão de vapor de água

O comportamento do vapor de água nos materiais porosos varia em função das dimensões dos seus poros e de diferenças de pressão parcial. Existem dois tipos de transporte de vapor que podem ocorrer: a efusão e a difusão de vapor. A sua ocorrência é determinada pelo factor de Knudsen enunciado pela expressão seguinte (Krus, 1996):

$$Kn = \frac{L}{2r} \quad (2-29)$$

onde:

$L$  [m]: caminho livre médio

$r$  [m]: raio do poro

Para poros com diâmetros inferiores a  $L$  ( $r < 5 \cdot 10^{-9} \text{m}$ ) ocorre um movimento molecular de Knudsen designado por efusão. São poros pequenos onde as colisões entre as moléculas e as paredes do poro são mais frequentes que as colisões intermoleculares. Caso o diâmetro dos poros seja muito maior que o caminho livre médio ( $r > 10^{-6} \text{m}$ ), ocorrem colisões entre as

moléculas, num tipo de transporte designado por difusão de vapor de água. A difusão de vapor de água nos poros de maior dimensão pode ser comparada com a difusão de vapor de água no ar.

Numa gama de diâmetros intermédia existe um transporte misto, onde a interacção entre os fenómenos de efusão e difusão, bem como as redundâncias existentes na estrutura porosa dos materiais, é tida em conta através da aplicação de um factor de resistência à difusão de vapor, na Lei de Fick (Künzel, 1995):

$$g_v = \frac{\delta}{\mu} \frac{\partial P_p}{\partial x} \quad (2-30)$$

onde:

$g_v$  [kg/m<sup>2</sup>.s]: fluxo de vapor de água

$\mu$  [-]: factor de resistência à difusão de vapor de água

$\delta$  [kg/m.s.Pa]: coeficiente de difusão de vapor de água no ar

$P_p$  [Pa]: pressão parcial de vapor de água

O factor de resistência à difusão de vapor  $\mu$  é dado pela seguinte expressão (Henriques, 2011):

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta_m} \quad (2-31)$$

onde:

$\delta_m$  [kg/m<sup>2</sup>.s.Pa]: permeabilidade ao vapor de água do material

$\mu$  [-]: factor de resistência à difusão de vapor

$\delta_a$  [kg/m<sup>2</sup>.s.Pa]: permeabilidade ao vapor de água do ar

$$\delta_a = \frac{2.0.10^{-7} T^{0.81}}{P_L} \quad (2-32)$$

onde:

$T$  [K]: temperatura ambiente

$P_L$  [Pa]: Pressão do ar ambiente

### **Permeância e camada de ar de difusão equivalente, $S_d$**

A permeância representa o quociente entre a permeabilidade do material e a espessura da camada,  $\delta/e$ , e é utilizada para caracterizar barreiras pára-vapor, dado que a espessura das camadas deste tipo de material é desprezável.

As barreiras pára-vapor podem também ser caracterizadas por meio de uma camada de ar de difusão equivalente que representa a espessura de ar que equivale à mesma permeância da espessura do material (Henriques, 2011).

$$S_d = \mu \cdot e \quad (2-33)$$

onde:

$S_d$  [m]: camada de ar de difusão equivalente

$\mu$  [-]: factor de resistência à difusão de vapor

$e$  [m]: espessura da camada

### **Caixas de ar e membranas**

Sendo um programa essencialmente focado em materiais sólidos, as camadas de ar apresentadas no WUFI são destinadas a simular a transferência de calor por condução e a difusão de vapor.

As membranas que constituem barreiras pára-vapor e outros elementos de impermeabilização e protecção da superfície podem ser introduzidas no programa de formas distintas. Caso esteja localizada na superfície interior ou exterior do elemento construtivo pode ser introduzida apenas como uma espessura de camada de ar de difusão equivalente  $S_d$ , se estiver localizada no interior do elemento tem de ser adicionada explicitamente no menu onde se discriminam as camadas do elemento a simular.

Uma membrana possui normalmente uma espessura de décimas ou mesmo centésimas de milímetro, o que faz com que os elementos de grelha que têm de ser definidos se tornem muito finos. Por razões de ordem numérica os elementos de grelha das camadas vizinhas não devem diferir muito nas suas espessuras pois nesse caso serão necessárias malhas progressivamente mais finas para evitar grandes discrepâncias, e uma maior exigência de cálculo (WUFI Help).

#### 2.4.3.5. Coeficientes de transferência de água líquida

O mecanismo de transporte que predomina nos capilares de um material poroso é o transporte líquido capilar. Trata-se de um fenómeno de convecção, no entanto, no contexto da física das construções é tratado como um fenómeno de difusão que se baseia na equação de Fick (WUFI Help):

$$g_w = -D_w(w) \frac{dw}{dx} \quad (2-34)$$

onde:

$g_w$  [kg/m<sup>2</sup>.s]: densidade do fluxo de humidade

$w$  [kg/m<sup>3</sup>]: teor de humidade

$D_w$  [m<sup>2</sup>/s]: coeficiente de transporte líquido

#### Coeficiente de sucção, $D_{ws}$

O coeficiente de sucção representa a captação de água pelos capilares à superfície do elemento construtivo quando esta se encontra totalmente molhada. Nesta fase há um domínio dos capilares maiores, cuja menor tensão de sucção é compensada por uma menor resistência ao fluxo de água, tema já abordado no capítulo 2.4.3.3 (WUFI Help).

#### Coeficiente de redistribuição, $D_{ww}$

O coeficiente de redistribuição representa o final da fase de molhagem do material e a consequente migração da água que entrou no elemento construtivo. Nesta fase não ocorre mais entrada de água líquida no material e são os capilares mais pequenos que retiram água aos capilares maiores por possuírem uma maior tensão de sucção como foi abordado em 2.4.3.3.

A redistribuição é um processo mais lento pois os capilares menores oferecem maior resistência ao fluxo de água, o que faz com que o valor do coeficiente de redistribuição seja muito menor que o coeficiente de sucção (WUFI Help).

#### Processamento dos coeficientes de transferência de água líquida no WUFI

O WUFI utiliza dois coeficientes de transferência de água líquida para cada material higroscópico, que são utilizados dependendo da ocorrência de precipitação ou da sua

ausência. O coeficiente de transporte líquido apresenta, aproximadamente, uma dependência exponencial relativamente ao teor de humidade. Por essa razão, o WUFI introduz os dois coeficientes utilizados em tabelas separadas com uma interpolação logarítmica. Como apenas existem valores dos coeficientes para um número reduzido de materiais é importante estimar valores, recorrendo a uma aproximação exponencial de  $D_{ws}$  aos valores de teor de humidade,  $w$ .

$$D_{ws} = 3.8. \left( \frac{A}{w_f} \right)^2 1000^{\left( \frac{w}{w_f} - 1 \right)} \quad (2-35)$$

onde:

$D_{ws}$  [ $m^2/s$ ]: coeficiente de transferência de água líquida para sucção

$A$  [ $kg/m^2 \cdot \sqrt{s}$ ]: coeficiente de absorção de água

$w$  [ $kg/m^3$ ]: teor de humidade

$w_f$  [ $kg/m^3$ ]: *free saturation*

Assim, com a *curva de armazenamento de humidade* conhecida, o WUFI gera de forma automática uma tabela com coeficientes  $D_{ws}$  determinados apenas com a introdução do valor do coeficiente de absorção de água,  $A$  (WUFI Help).

#### **2.4.3.6. Orientação, inclinação e altura**

A orientação da parede é definida seleccionando o ponto cardinal correspondente entre oito direcções pré-definidas: N-NE-E-SE-S-SW-W-NW. Como os elementos construtivos em estudo são paredes, estes possuem uma inclinação de 90° em relação ao plano horizontal.

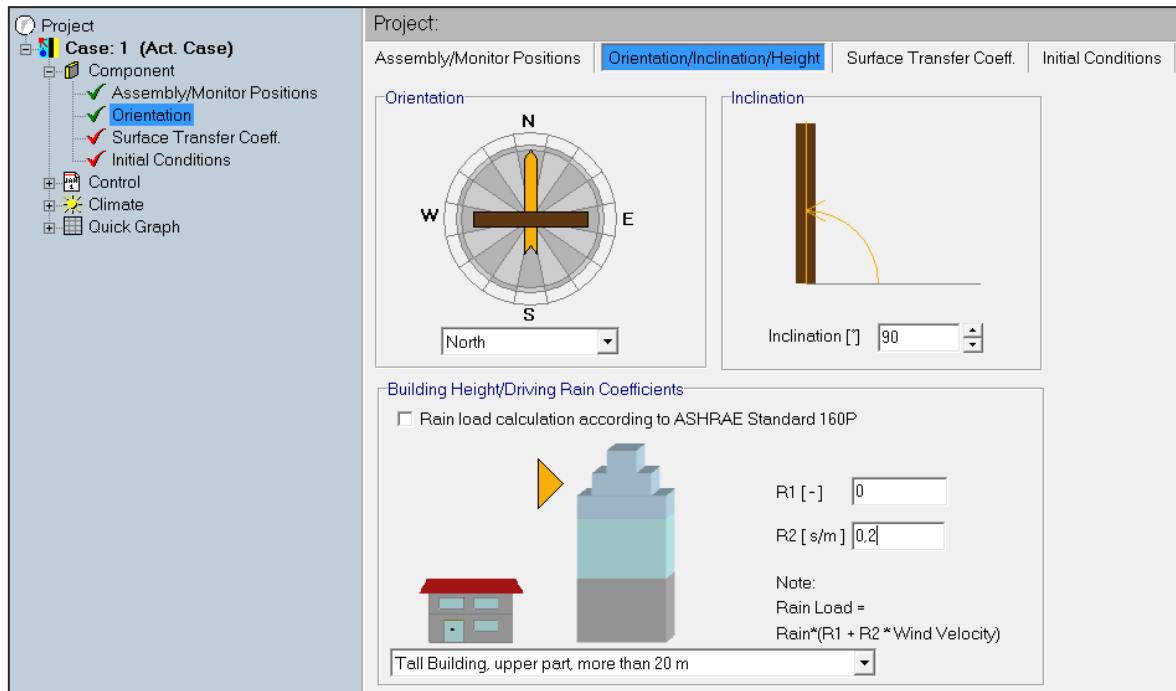


Figura 2.11 – Interface do menu Orientação / Inclinação / Altura (WUFI Pro)

A altura do edifício onde está o elemento construtivo influencia o valor da chuva incidente na parede. O WUFI apresenta ao utilizador uma imagem gráfica do edifício onde podem ser seleccionadas quatro hipóteses para definir a altura do edifício e a consequente chuva incidente na fachada. Estas opções fazem variar os coeficientes que influenciam a precipitação que atinge a parede, e que são enunciados seguidamente. (WUFI Help).

### **Coeficientes de pluviosidade incidente segundo ensaios computacionais**

A primeira forma de determinar a quantidade de chuva que atinge o paramento exterior da parede é baseada na seguinte expressão:

$$C_i = C \cdot (R_1 + R_2 \cdot V) \quad (2-36)$$

onde:

$C_i$  [L/m<sup>2</sup>h]: quantidade de precipitação incidente no paramento da parede

$C$  [L/m<sup>2</sup>h]: quantidade total de precipitação

$V$  [m/s]: velocidade do vento medida a uma altura de 10m, em zona sem obstáculos

$R_1$  [-]: coeficiente de chuva incidente

$R_2$  [s/m]: coeficiente de chuva incidente

Os coeficientes  $R_1$  e  $R_2$  são muito dependentes da localização específica da fachada do edifício. Para superfícies verticais, que são as superfícies tratadas nesta dissertação, o valor de  $R_1$  é nulo e o valor de  $R_2$  é de cerca de 0,2 s/m, para uma fachada sem a influência de edifícios na envolvente, e de 0.07 s/m para uma região central da fachada, dado que a chuva incidente não afecta toda a fachada da mesma forma (WUFI Help).

#### **2.4.3.7. Coeficientes de transferência superficial**

A evolução das distribuições de temperatura e humidade depende não só das equações que governam o seu transporte através das diferentes camadas, mas também das trocas de calor e vapor de água que ocorrem entre a superfície da parede e o ambiente envolvente.

Na Figura 2.12 está representado o menu correspondente aos coeficientes de transferência superficial. Nesta fase é necessário atribuir valores que caracterizem a resistência térmica superficial exterior e interior, os valores da camada de ar de difusão equivalente,  $S_d$ , os valores associados à absorção de radiação de onda curta e de emissão de radiação de onda longa, bem como o factor de absorção de pluviosidade incidente, que estão associados ao revestimento que é utilizado na parede. Em seguida são apresentados os fundamentos teóricos de cada parâmetro enunciado neste capítulo.

The screenshot displays the WUFI Pro software interface for setting surface transfer coefficients. The left sidebar shows a project tree with 'Case: 1 (Act. Case)' expanded, containing 'Component', 'Assembly/Monitor Positions', 'Orientation', 'Surface Transfer Coeff.' (selected), and 'Initial Conditions'. The main window has a top navigation bar with tabs: 'Assembly/Monitor Positions', 'Orientation/Inclination/Height', 'Surface Transfer Coeff.' (active), and 'Initial Conditions'. The 'Surface Transfer Coeff.' tab is divided into two sections: 'Exterior Surface (Left Side)' and 'Interior Surface (Right Side)'. The 'Exterior Surface' section includes input fields for 'Heat Resistance [m²K/W]' (0.0588), 'Sd-Value [m]' (No coating), 'Short-Wave Radiation Absorptivity [-]' (0.2), 'Long-Wave Radiation Emissivity [-]' (0.9), and 'Rain Water Absorption Factor [-]' (0.7). The 'Interior Surface' section includes input fields for 'Heat Resistance [m²K/W]' (0.125) and 'Sd-Value [m]' (No coating). A 'Details >>' button is located between the exterior and interior sections.

**Figura 2.12 – Interface do menu dos coeficientes de transferência superficiais  
(WUFI Pro)**



## **Transferência de calor**

### **Condutância térmica superficial**

Quando a superfície de uma parede está mais quente que a sua envolvente, esta perde calor. A transferência de calor ocorre por meio de vários mecanismos: o transporte de calor através da camada de ar adjacente à superfície da parede; o transporte por convecção através de fluxos de ar; a emissão de radiação de onda longa. Todos estes mecanismos são de difícil modelação, no entanto é suficiente a aplicação de um coeficiente constante de proporcionalidade entre o fluxo de calor e a temperatura, no contexto da física das construções. A condutância térmica superficial exterior,  $h_{ext}$ , é composta por duas partes, a parte referente à convecção e outra parte referente à radiação, sendo o fluxo de calor dado pela seguinte expressão (WUFI Help):

$$q = (h_{conv} + h_{rad}) \cdot \Delta T = h_{ext} \cdot \Delta T \quad (2-37)$$

$q$  [W/m<sup>2</sup>]: intensidade do fluxo de calor

$h_{ext}$  [W/m<sup>2</sup>K]: condutância térmica superficial exterior

$\Delta T$  [°C]: diferença entre a temperatura superficial e temperatura exterior

$h_{conv}$  [W/m<sup>2</sup>K]: condutância térmica superficial exterior por convecção

$h_{rad}$  [W/m<sup>2</sup>K]: condutância térmica superficial exterior por radiação

Esta associação entre as condutâncias convectiva e radiativa é uma simplificação relativamente às formas de calcular de ambos os tipos de transferência de calor. Em casos de convecção forçada em que a superfície da parede esteja sujeita ao vento, os efeitos da radiação são desprezáveis (Henriques, 2011).

### **Condutância térmica superficial por convecção**

No caso da temperatura da superfície da parede ser superior à do ar adjacente, verifica-se uma transferência de calor por condução para o ar imediatamente em contacto com o elemento construtivo, fazendo com que este ar aumente de temperatura, o que não se traduz de uma forma constante. Com o aumento da distância à parede, verifica-se que a temperatura do ar resultante dos fenómenos de convecção assume um valor aproximadamente constante, sendo designada por temperatura ambiente.

O fluxo de calor que é transferido da superfície da parede é determinado a partir da diferença entre a temperatura da superfície da parede e a temperatura da camada limite, que compreende a distância entre a superfície da parede e a região a partir da qual a temperatura se torna constante (Henriques, 2011). Por esta razão, o fluxo de calor é mais baixo do que o cálculo com a diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura superficial, dado ser uma temperatura intermédia. Esta redução do fluxo de calor é tida em conta com a introdução de uma resistência térmica superficial, que corresponde ao valor inverso da condutância térmica. O valor da condutância térmica superficial depende da temperatura, da velocidade e direcção do fluxo de ar, bem como das características da superfície (WUFI Help).

### **Condutância térmica superficial por radiação**

Existem sempre trocas por radiação entre a superfície da parede e a sua envolvente. O fluxo de calor envolvido depende da temperatura até à quarta potência, dos materiais, da natureza das superfícies e do tamanho e arranjo geométrico das superfícies envolvidas. A dependência do material e das características da superfície é desprezável, desde que este não seja metálico. Dado que não são conhecidas as temperaturas das outras superfícies, assume-se que estas possuem uma temperatura idêntica à temperatura ambiente, havendo assim uma dependência da condutância térmica superficial por radiação da temperatura ambiente pela equação (WUFI Help):

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{\text{amb}}^4 - T_s^4) \quad (2-38)$$

onde:

$q$  [W/m<sup>2</sup>]: intensidade do fluxo de calor

$\varepsilon$  [-]: emissividade de radiação de onda longa

$\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$  [W/m<sup>2</sup>.K<sup>4</sup>]: constante de Stefan-Boltzmann

$T_s$  [°C]: temperatura superficial

$T_{\text{amb}}$  [°C]: temperatura ambiente

A condutância térmica superficial por radiação apenas é aplicável à radiação trocada entre superfícies que possuam a temperatura ambiente, sendo que a radiação solar é tratada separadamente, por constituir uma fonte de 6000K de temperatura com uma variação diária.

### **Resistência Térmica Superficial**

De acordo com a condutância térmica superficial, o WUFI aplica uma resistência térmica superficial exterior que representa o valor inverso desta, e pode ser aplicada de forma constante ou dependente da velocidade do vento, no exterior. No paramento interior da parede é aplicado um valor constante.

A resistência térmica superficial é um valor que depende do tipo de parede que se está a estudar. Para uma parede exterior o valor considerado pelo programa é de  $0.0588 \text{ m}^2\text{K/W}$ . A resistência térmica superficial interior tem sempre o mesmo valor, que é de  $0.125 \text{ m}^2\text{K/W}$ .

Existe a particularidade de se poder seleccionar uma dependência do vento na resistência superficial exterior. De acordo com o tipo de ficheiro climático da região onde se faz o estudo, existe uma formulação que define o valor final deste parâmetro, sendo o ficheiro climático de Lisboa do tipo \*.wac.

Para uma inclinação do elemento construtivo inferior a  $10^\circ$  que esteja em condições de vento permanente (WUFI Help):

$$h_{\text{ext}} = 1.6 \cdot V + 4.5 + 6.5 \quad (2-39)$$

Caso o ângulo do elemento construtivo com a horizontal seja superior a  $10^\circ$ , e a superfície estiver oposta à direcção do vento:

$$h_{\text{ext}} = 0.33 \cdot V + 4.5 + 6.5 \quad (2-40)$$

onde:

$h_{\text{ext}}$  [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]: condutância térmica superficial exterior

$V$  [ $\text{m/s}$ ]: velocidade do vento

O valor da resistência superficial é o inverso da condutância superficial abordada no presente capítulo. As resistências térmicas descrevem apenas as trocas de calor com o ar ambiente ou com superfícies da envolvente, que estão a uma temperatura próxima da temperatura da superfície do elemento construtivo (WUFI Help).

### **Emissividade de radiação de onda longa**

A emissividade de radiação de onda longa representa a relação entre a energia emitida por uma superfície e o valor máximo emitido por um corpo negro à mesma temperatura

(Henriques, 2011). A emissividade de radiação de onda longa toma o valor de 0,9 para todos os materiais que não sejam metálicos.

### **Coeficiente de absorção de radiação de “onda curta”**

Os coeficientes de transferência de calor contêm à partida um componente que corresponde à radiação de onda longa que é trocada com outras superfícies na envolvente. A temperatura destas superfícies é considerada igual à temperatura do ar. A radiação solar apresenta uma grande variação durante o dia, e não pode ser associada à temperatura do ar (WUFI Help).

As trocas radiativas entre o elemento construtivo e a sua envolvente tomam lugar, essencialmente, no espectro infra-vermelho ( $T \approx 300\text{K}$ ), sendo que o espectro de radiação solar também contém uma quantidade considerável de radiação de onda curta ( $T \approx 6000\text{K}$ ). O coeficiente de absorção de radiação de onda curta indica a fracção de radiação solar incidente, ou seja, o conjunto de radiação de onda longa e onda curta, que atingem a superfície da parede (WUFI Help).

$$q_{\text{solar}} = a_s I \quad (2-41)$$

onde:

$q_{\text{solar}}$  [ $\text{W/m}^2$ ]: fluxo de calor proveniente da radiação solar

$a_s$  [-]: coeficiente de absorção de radiação de onda curta

$I$  [ $\text{W/m}^2$ ]: radiação solar vertical relativamente à superfície

A temperatura superficial da parede é influenciada pelo factor de absorção de radiação, pela intensidade da radiação solar e pela condutância térmica superficial exterior, dada pela seguinte equação:

$$T_{\text{se}} = T_e + \frac{a_s \cdot I}{h_{\text{ext}}} \quad (2-42)$$

$a_s$  [-]: coeficiente de absorção de radiação de onda curta

$I$  [ $\text{W/m}^2$ ]: radiação solar vertical relativamente à superfície

$\left(\frac{1}{h_{\text{ext}}}\right)$  [ $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$ ]: resistência térmica superficial exterior

#### 2.4.3.8. Transferência de vapor de água

O transporte de vapor de água à superfície da parede pode ser descrito de forma semelhante ao transporte de calor, dado que a existência de uma camada de ar adjacente ao paramento da parede que provoca uma resistência térmica vai também oferecer uma resistência à difusão de vapor de água.

O fluxo de vapor de água é dado por:

$$g_v = \beta_p (P_{se} - P_e) \quad (2-43)$$

onde:

$g_v$  [kg/m<sup>2</sup>s]: fluxo de vapor de água

$\beta_p$  [kg/m<sup>2</sup>sPa]: coeficiente de transferência de vapor de água

$P_{se}$  [Pa]: pressão parcial de vapor de água do ambiente exterior

$P_e$  [Pa]: pressão parcial de vapor de água à superfície

Quando ocorre a mudança de fase da água líquida para o estado gasoso (evaporação) ou do estado gasoso para o estado líquido (condensação) dá-se uma absorção de energia no primeiro caso e uma libertação de energia no segundo caso. A libertação de energia provoca o aquecimento e quando esta é absorvida, dá-se um arrefecimento. O coeficiente de transferência de vapor de água  $\beta_p$  é obtido através da condutância térmica superficial o que permite ter em conta a influência dos movimentos de ar quando se determina o fluxo de vapor (Henriques, 2011):

$$\beta_p = 7 \cdot 10^{-9} \cdot h_{conv} \quad (2-44)$$

onde:

$h_{conv}$  [W/m<sup>2</sup>K]: condutância térmica superficial exterior por convecção

O fluxo de calor,  $q$ , resultante da condensação ou evaporação, resulta do fluxo da multiplicação do fluxo de vapor,  $g_v$ , pelo calor latente de evaporação da água,  $h_v$  (Henriques, 2011):

$$q = g_v \cdot h_v \quad (2-45)$$

onde:

$q$  [W/m<sup>2</sup>]: fluxo de calor

$g_v$  [kg/m<sup>2</sup>s]: fluxo de vapor de água

$h_v$  [kJ/kg]: calor latente de evaporação da água ( $h_v=2501$  kJ/kg)

#### **2.4.3.9. Revestimentos de superfície**

Podem existir revestimentos na parede que, embora não possuam relevância do ponto de vista da resistência térmica, impedem a difusão de vapor de água. O programa dá a possibilidade de definir o revestimento de superfície em valor de espessura de camada de difusão de vapor de água equivalente,  $S_d$ , e evitar a colocação de uma camada muito fina no menu de definição do elemento construtivo.

No caso de se tratar de uma parede sem revestimento o valor a colocar deve ser nulo, dado que diz apenas respeito ao revestimento, o WUFI já contabiliza o valor da camada de ar.

#### **2.4.3.10. Factor de redução da precipitação**

Alguma da chuva que atinge a superfície de uma parede ressalta e não é contabilizada no balanço higroscópico. Deste modo, o WUFI determina a quantidade de chuva a atingir a parede a partir do ficheiro climático, multiplica-o por um factor de redução e é a quantidade resultante deste cálculo que é admitida como água disponível para ser absorvida pelo elemento construtivo.

Este factor depende da inclinação do elemento e das características da precipitação, quer se trate de neve ou de chuva, sendo a neve um acontecimento raro na região de Lisboa.

#### **2.4.4. Clima interior e exterior**

As simulações higrotérmicas de paredes exteriores necessitam de ver definidas as condições que se verificam no ambiente exterior e no ambiente interior. Deste modo, é necessário introduzir a informação horária da temperatura e humidade relativa do ambiente exterior e do ambiente interior, a radiação e a pluviosidade incidente na fachada da parede pelo lado exterior. Ao seleccionar *Outdoor* ou *Indoor* na opção *Climate* na barra lateral, é apresentado um menu semelhante para ambas as opções, onde se definem os dados climáticos (Figura 2.13).

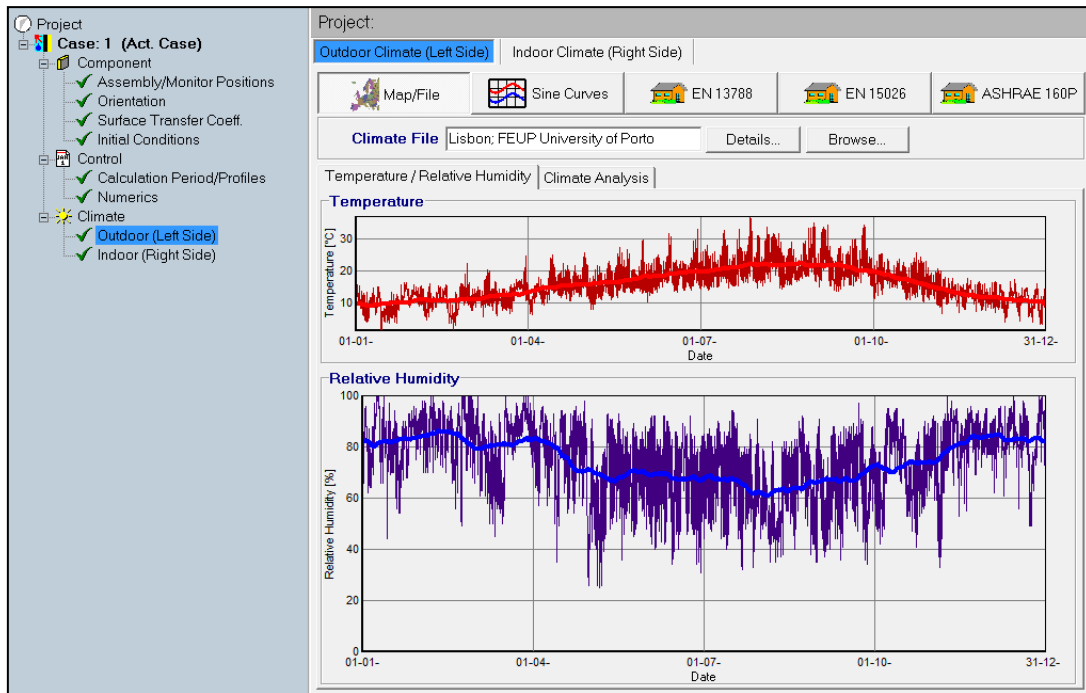


Figura 2.13 – Interface de definição dos dados climáticos (WUFI Pro)

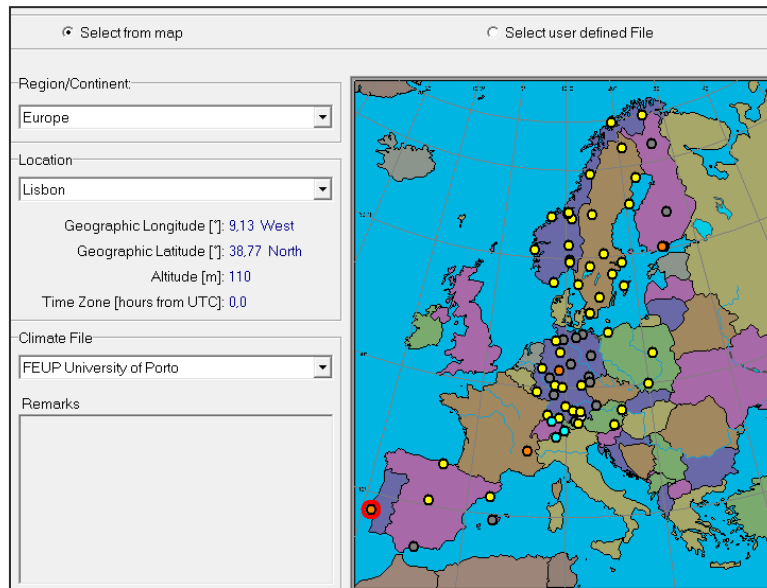
As condições interiores e exteriores podem ser determinadas a partir de cinco opções diferentes. A escolha de um ficheiro climático, a definição da temperatura e humidade relativa por meio de curvas de seno, e a utilização das normas europeias EN 13788 e EN 15026.

#### 2.4.4.1. Ficheiro Climático

O WUFI possui um conjunto de ficheiros climáticos de várias regiões do mundo, que vêm incluídas na base de dados do programa, mas podem também ser definidos manualmente os ficheiros climáticos que se pretende utilizar e serem posteriormente acedidos através do *software*. Na presente dissertação o ficheiro climático exterior corresponde à cidade de Lisboa.

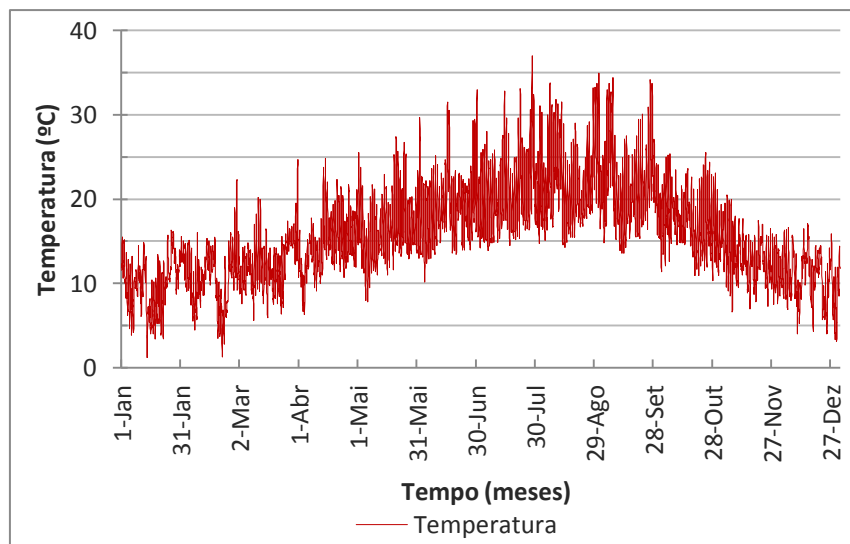
O ficheiro climático de Lisboa, do tipo \*.WAC, pode ser seleccionado accionando a opção *Browse* no menu *Outdoor* e posteriormente no mapa (Figura 2.14).

## Análise Comparativa de Diferentes Modelos de Simulação Numérica na Avaliação da Ocorrência de Condensações Internas



**Figura 2.14 – Selecção do ficheiro climático de Lisboa (WUFI Pro)**

O ficheiro climático de Lisboa fornece informação acerca das temperaturas e humidades relativas exteriores (Figura 2.15 e Figura 2.16). Nestes gráficos é possível visualizar os períodos mais quentes, que atingem uma temperatura máxima de 37°C no Verão (Agosto), e os períodos mais frios que correspondem a 1,2°C no mês de Janeiro.



**Figura 2.15 – Temperaturas do ficheiro climático de Lisboa no período de um ano**



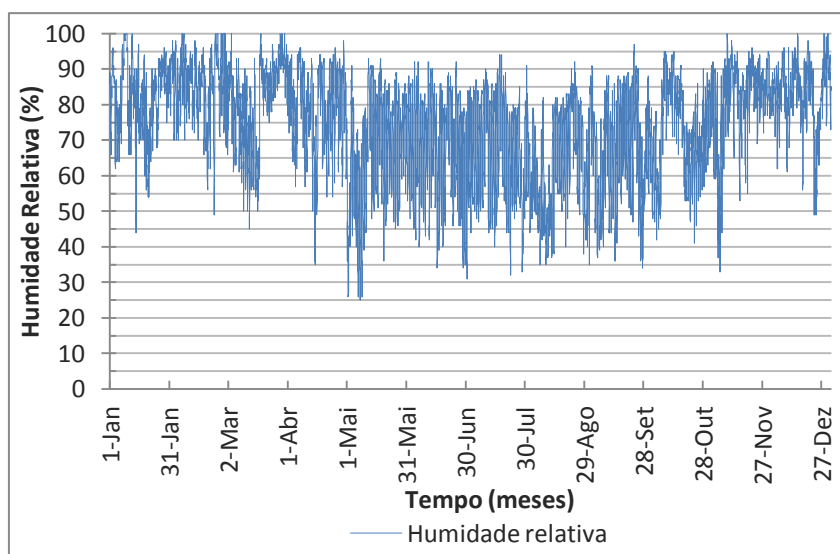


Figura 2.16 – Humidade relativa do ficheiro climático de Lisboa no período de um ano

A análise climática do ficheiro pode ser feita seleccionando *Climate Analysis* e *Analyse*. Neste menu são mostradas as temperaturas e humidades relativas médias, máximas e mínimas, e os pontos cardeais com maior incidência de precipitação e radiação solar (Figura 2.17).

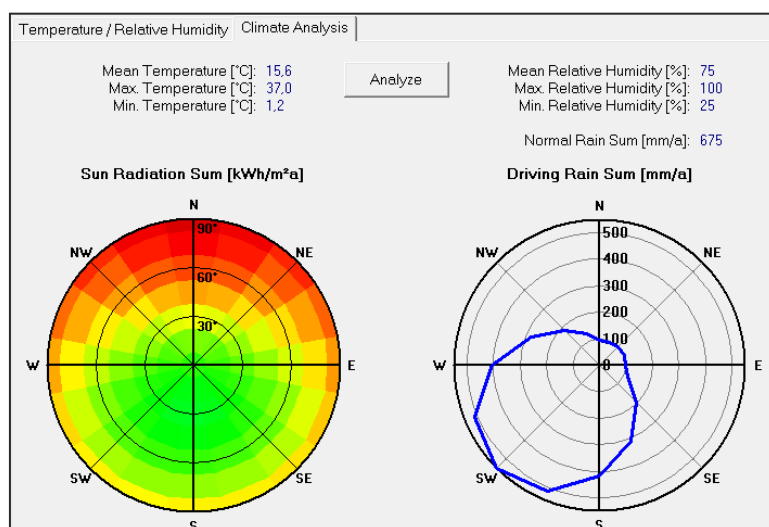


Figura 2.17 – Análise climática do ficheiro de Lisboa (WUFI Pro)

No caso da radiação, a direcção com maior exposição solar é virada a sul com  $30^\circ$  de inclinação em relação ao plano do solo, com uma intensidade de  $1878 \text{ kWh/m}^2\text{ano}$ . Para a chuva incidente, uma parede virada a Sudoeste receberá uma quantidade de água de  $675 \text{ mm/ano}$ .

Por um lado a direcção Sudoeste recebe mais precipitação sendo que, por outro lado, recebe uma parcela de radiação solar elevada. Uma parede virada a Norte receberá a menor quantidade de radiação e de precipitação.

#### **2.4.4.2. Curvas sinusoidais**

Poderá ser suficiente em alguns casos considerar apenas as flutuações da temperatura e humidade relativa a longo prazo. Nesse caso os parâmetros podem ser modelados por curvas sinusoidais com um período anual, ou apenas utilizando valores constantes. O WUFI permite a escolha entre condições do ambiente interior com concentração de humidade baixa, intermédia e elevada, condições pré-definidas para o ambiente exterior e a definição manual das curvas.

A concentração de humidade é definida pela seguinte expressão:

$$v = \frac{F}{Rph} \quad (2-46)$$

onde:

$v$  [kg/m<sup>3</sup>]: concentração de humidade

$F$  [kg/m<sup>3</sup>h]: produção de humidade

$Rph$  [1/h]: taxa de renovação de ar

#### **2.4.4.3. Norma EN13788**

Com esta opção o programa deduz o clima interior a partir dos dados do ficheiro climático, utilizando o algoritmo especificado na norma EN13788. A dedução é feita a partir da opção *use left climate* no menu *indoor* referente ao lado direito do elemento construtivo.

Para definir a humidade relativa interior, existem as classes de humidade presentes na norma definidas de 1 a 5 (Tabela 2.2) (Figura 2.18) combinadas com uma temperatura interior de valor constante, introduzida pelo utilizador. O cálculo da humidade relativa interior é determinado a partir desta temperatura e da humidade absoluta do ar interior pela seguinte expressão:

$$N_i = N_a + \delta N \quad (2-47)$$

onde:

$N_i$  [kg/m<sup>3</sup>]: humidade absoluta interior

$N_a$  [kg/m<sup>3</sup>]: humidade absoluta exterior

$\delta N$  [kg/m<sup>3</sup>]: suplemento de humidade determinado a partir de  $\theta_a$  por meio de uma função de concentração de humidade,  $N_a$

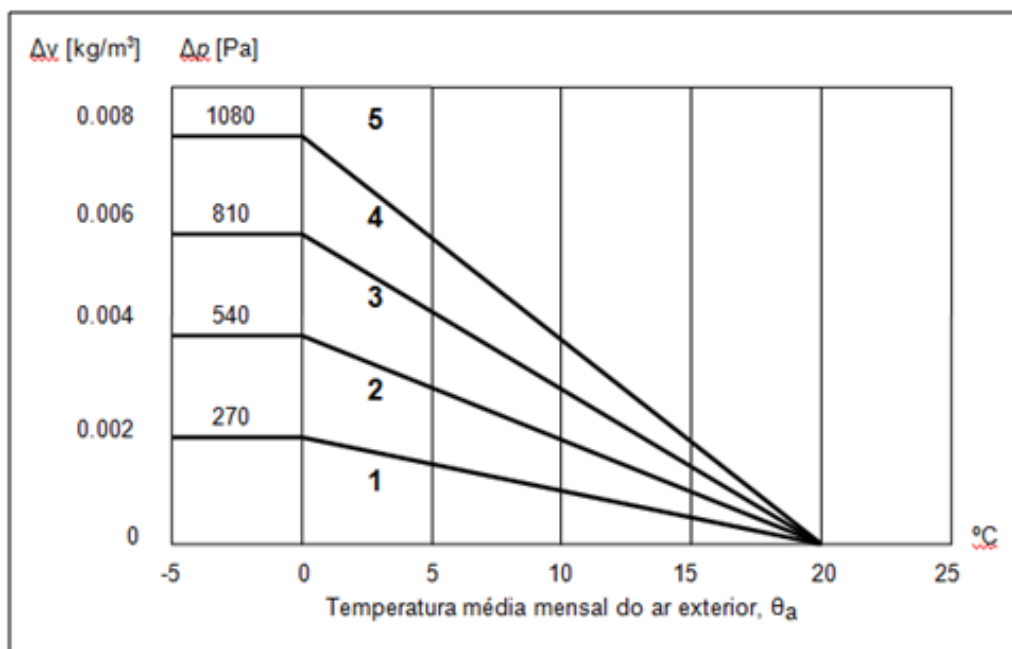
$$N_a = \varphi_a \cdot \text{humidade absoluta de saturação}(\theta_a) \quad (2-48)$$

$\theta_a$  : temperatura média mensal exterior

$\varphi_a$  : humidade relativa média mensal exterior

**Tabela 2.2 – Classes de humidade interior segundo a norma EN ISO 13788**  
(Adaptado de: EN13788, 2001)

Classe de Humidade	Edifícios
1	Armazéns
2	Escritórios, lojas
3	Edifícios com baixa ocupação
4	Edifícios com sobreocupação, pavilhões desportivos, cozinhas, refeitórios e edifícios aquecidos com gás.
5	Edifícios especiais (lavandarias, piscinas, cervejaria)



**Figura 2.18 – Variação das classes de humidade interna com a temperatura externa segundo a norma EN ISO 13788**  
(Adaptado de: EN 13788, 2001)

#### 2.4.4.4. Norma EN 15026

A norma EN 15026 faz uma aproximação da temperatura interior a partir das temperaturas exteriores e utiliza dois níveis possíveis de humidade relativa. É utilizado no âmbito de edifícios habitacionais ou escritórios aquecidos. A humidade relativa interna é determinada a partir da Figura 2.19, que representa as funções de temperatura média mensal exterior e a sua conversão para humidade relativa. A humidade elevada é dada pelo traçado B e a normal é dada pelo traçado A. Para realizar a conversão, o *software* utiliza a opção da função A ou B e a temperatura média do ar exterior,  $\theta_e$ , para determinar a humidade relativa interior,  $\phi_i$ . No gráfico acima, na figura, é realizada a conversão da temperatura do ambiente interior.

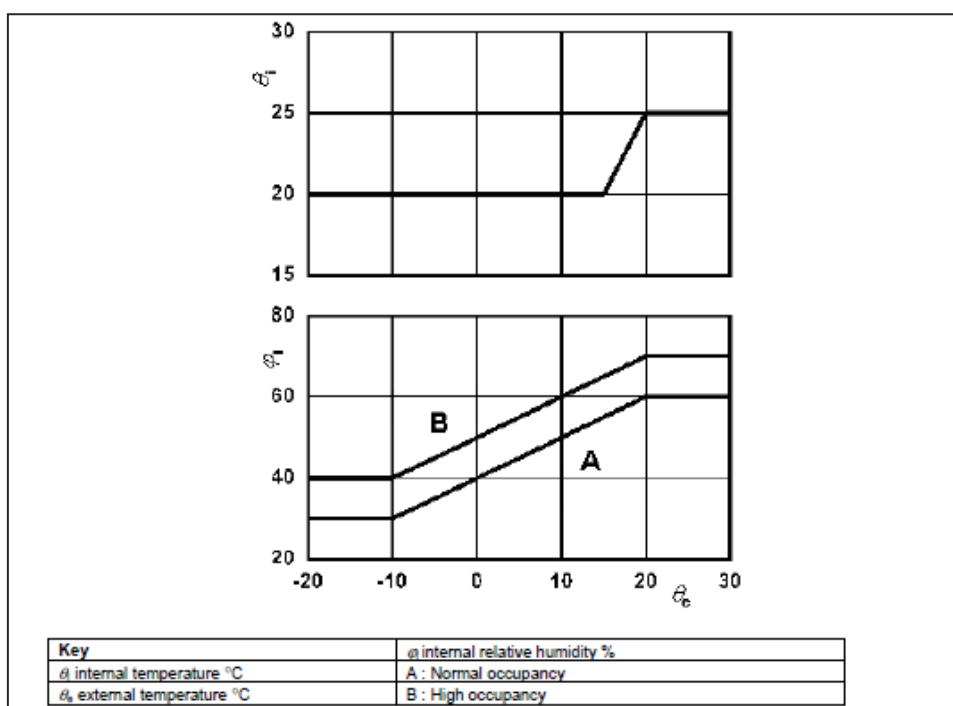


Figura 2.19 – Funções de temperatura e humidade interior segundo a norma pr15026  
(Fonte: EN15026, 2004)

#### 2.4.5. Condições iniciais

As condições iniciais do elemento construtivo baseiam-se na definição dos teores de humidade inicial de cada material que o constitui, seja através da escolha de uma humidade relativa única para todo o perfil da parede, seja por uma definição individual das camadas. É também necessário escolher uma temperatura inicial para todo o perfil da parede.

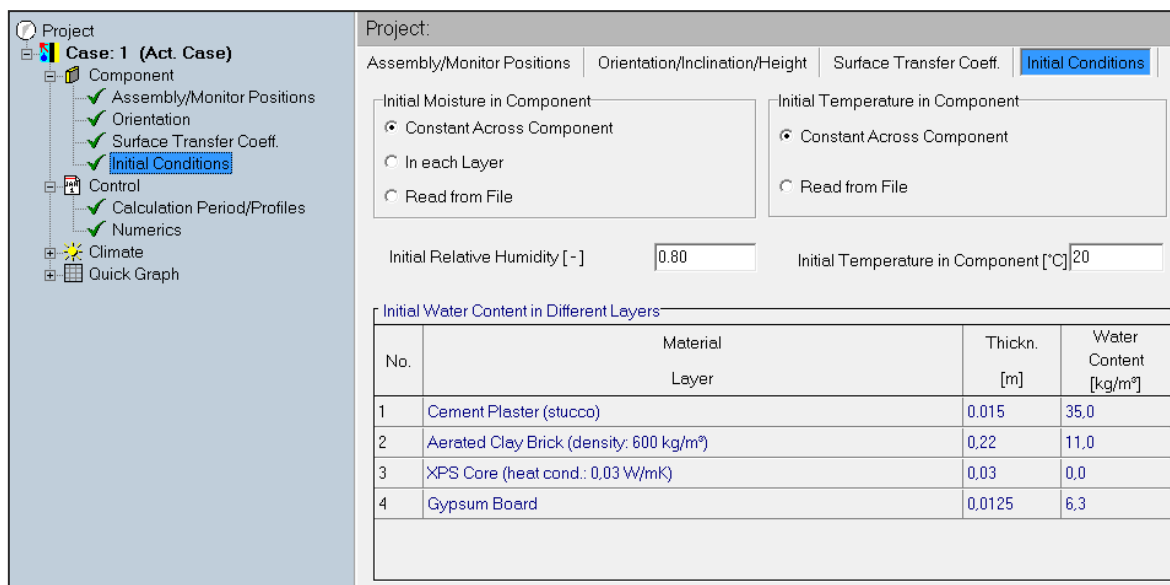


Figura 2.20 – Menu de definição das condições iniciais do elemento construtivo (WUFI Pro)

### Humidade Relativa e Temperatura Inicial

Quando se aplica um valor de humidade relativa inicial  $\phi$  constante ao longo de todo o elemento construtivo o programa calcula um valor de teor de humidade  $w$  diferente para cada tipo de material, dado existirem diferentes *curvas de armazenamento de humidade*. Resultam assim valores de teor de humidade diferentes que correspondem a cruzar a humidade relativa introduzida com o gráfico que representa a *curva de armazenamento de humidade* (WUFI Help).

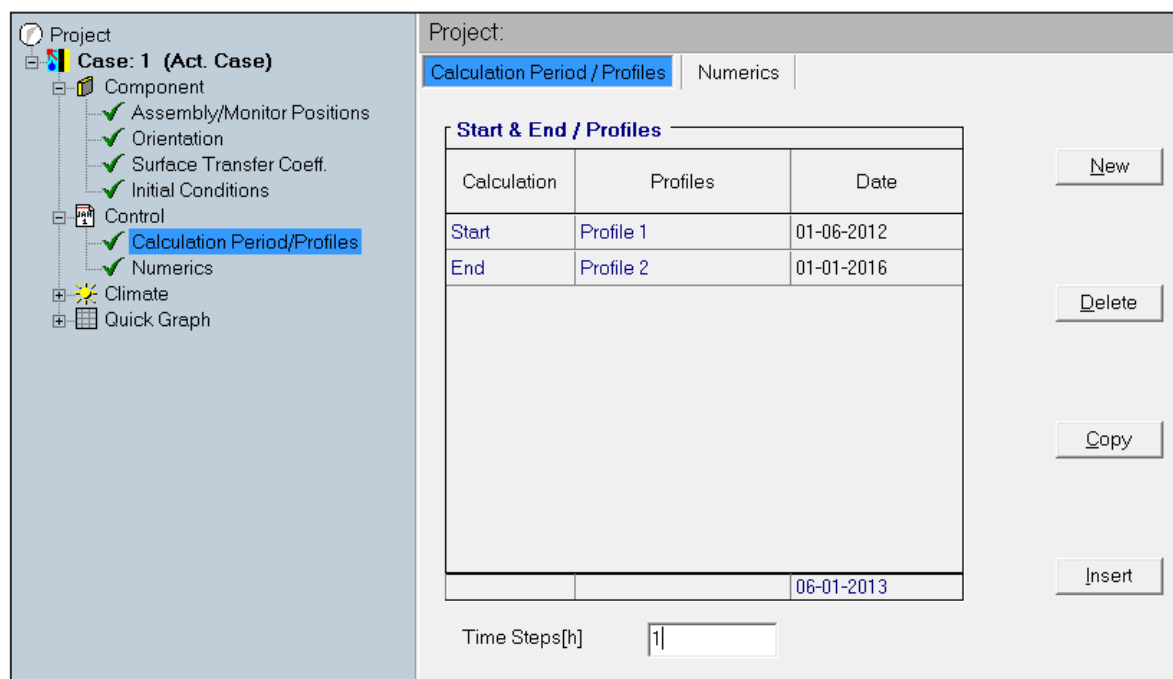
Pode ainda ser definido, individualmente para cada camada, um valor de teor de humidade que permite introduzir diferentes valores de humidade inicial em cada camada, havendo a conversão desse valor de teor de humidade em humidades relativas diferentes para cada material dependendo da sua *curva de armazenamento de humidade*. Finalmente existe um botão designado por *Assign Typical Built-in Moisture*, que preenche o teor de humidade com a quantidade que esteja registada na base de dados de cada material (WUFI Help).

Nesta dissertação a escolha recaiu sobre uma humidade relativa de 80%, constante para todo o perfil da parede, com uma temperatura de 20°C igualmente constante. A humidade relativa necessita de uma simulação de período alargado de tempo para atingir uma estabilidade dinâmica contrariamente à temperatura, que estabiliza em poucas horas.

#### 2.4.6. Período de cálculo e perfis

Para definir os períodos de cálculo das simulações existe uma tabela onde o utilizador indica, recorrendo ao calendário ou introduzindo nos espaços as datas iniciais e finais, o

período de cálculo. Para além dos perfis higrótérmicos da parede no início e fim que são sempre fornecidos, podem ser pedidos perfis intermédios seleccionando a opção *New* para os quais se pode definir as datas do mesmo modo que os períodos de cálculo.



**Figura 2.21 – Menu de definição do período de tempo da simulação higrotérmica (WUFI Pro)**

Podem também ser definidos os *Time Steps* que correspondem ao período com que são feitos os cálculos, em horas. Este valor não pode ser superior ao intervalo dos dados do ficheiro climático. A solução mais simples é colocar os períodos de cálculo iguais aos períodos dos ficheiros climáticos. Caso se utilize um período diferente, deve-se escolher de forma a dividir o período do ficheiro climático em intervalos exactos, caso contrário o programa ajusta cada período de modo a que isso aconteça (WUFI Help).

### **2.4.7. Numérico**

O menu *Numerics*, representado na Figura 2.22, permite optar pelos fenómenos que são simulados, entre o cálculo do transporte de calor e o transporte de humidade, a exclusão do transporte de água pelos capilares e do calor latente de evaporação ou fusão. No que toca à precisão dos resultados, permite também aumentar a exactidão e utilizar uma convergência adaptada quando existam problemas de convergência das iterações do programa ou um balanço de água incoerente.

A activação de *Adaptive Time Step Control* consiste na definição de um número de *steps* e de um número máximo de *stages*. Quando ocorrem erros de convergência, é realizado

novamente o *time step* mas dessa vez sub-dividido pelo número de *steps* definidos, e com uma repetição máxima da sub-divisão do *time step* correspondente ao número de *stages* escolhidos (Jorne, 2010).

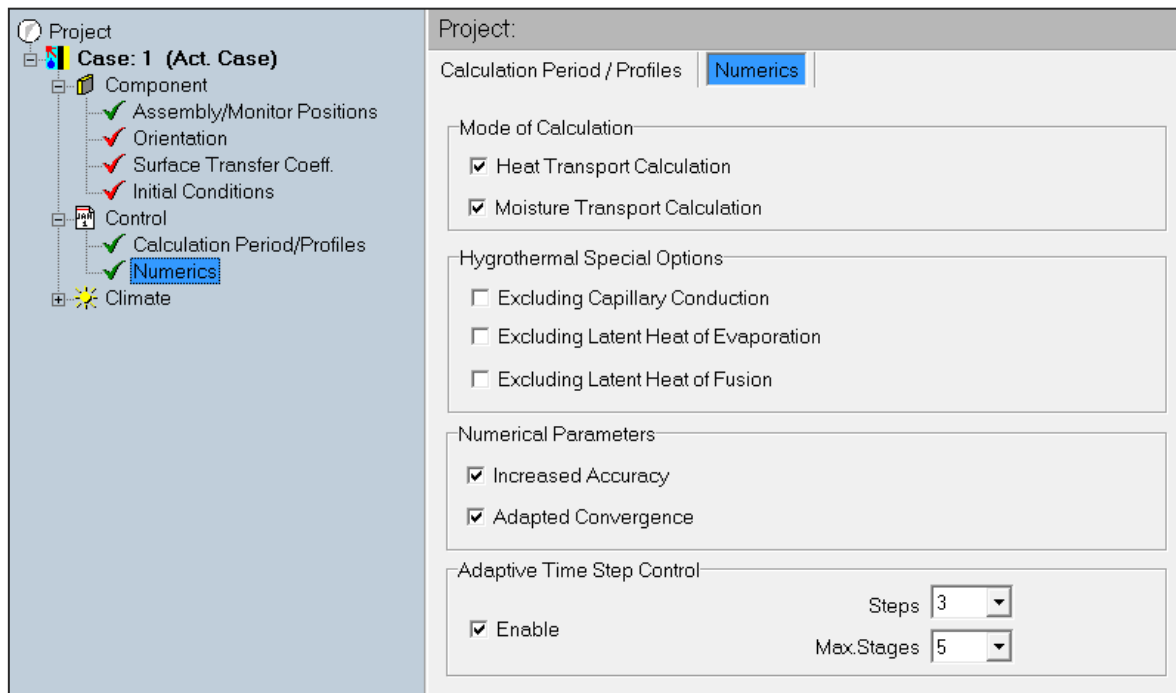


Figura 2.22 – Menu de definição das opções de cálculo numérico do WUFI (WUFI Pro)

#### 2.4.8. Leitura de resultados

Os resultados das simulações higrotérmicas realizadas no WUFI são apresentados de diferentes modos. O software disponibiliza um conjunto de resultados relativos aos teores de humidade total do elemento construtivo, e resultados individualizados para cada uma das camadas que o compõem (Figura 2.23). São apresentados também os resultados relativos aos pontos de monitorização definidos inicialmente, com os parâmetros de temperatura, humidade relativa e a possibilidade de obter as temperaturas de ponto de orvalho, temperatura à qual ocorre condensação.

## Análise Comparativa de Diferentes Modelos de Simulação Numérica na Avaliação da Ocorrência de Condensações Internas

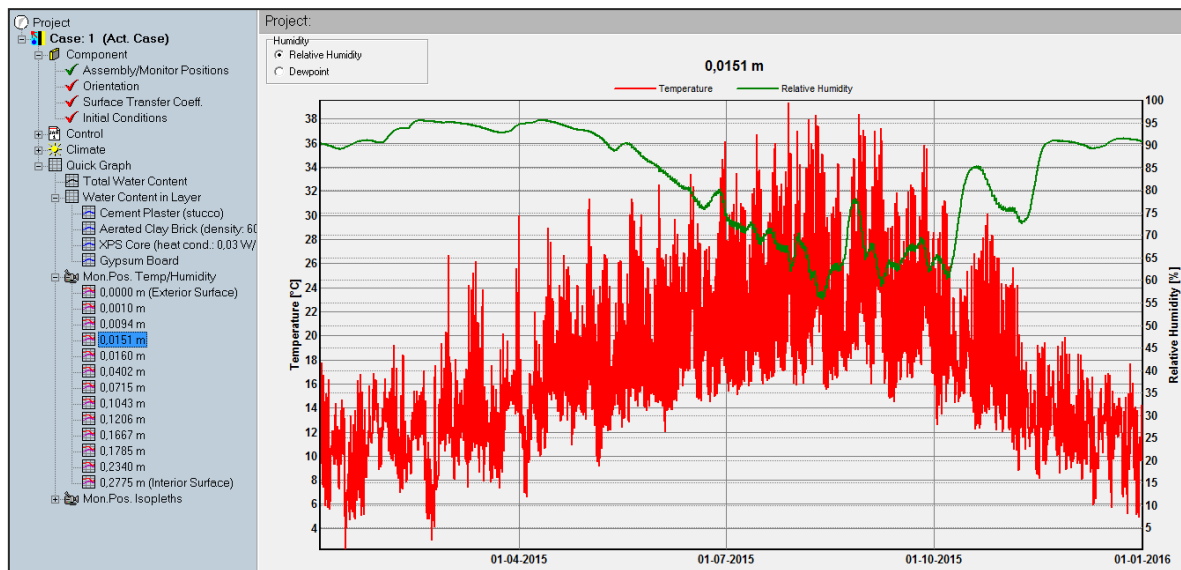


Figura 2.23 – Exemplo de resultados provenientes das posições de monitorização (WUFI Pro)

Outro modo de apresentação de resultados é a apresentação em filme, que mostra a evolução da humidade relativa, da temperatura e do teor de humidade ao longo do período de simulação, para o perfil do elemento construtivo simulado (Figura 2.24).

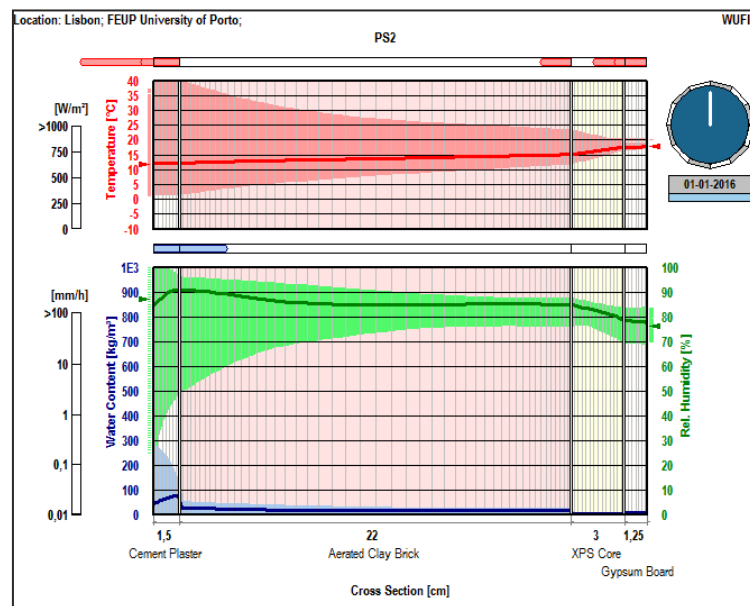
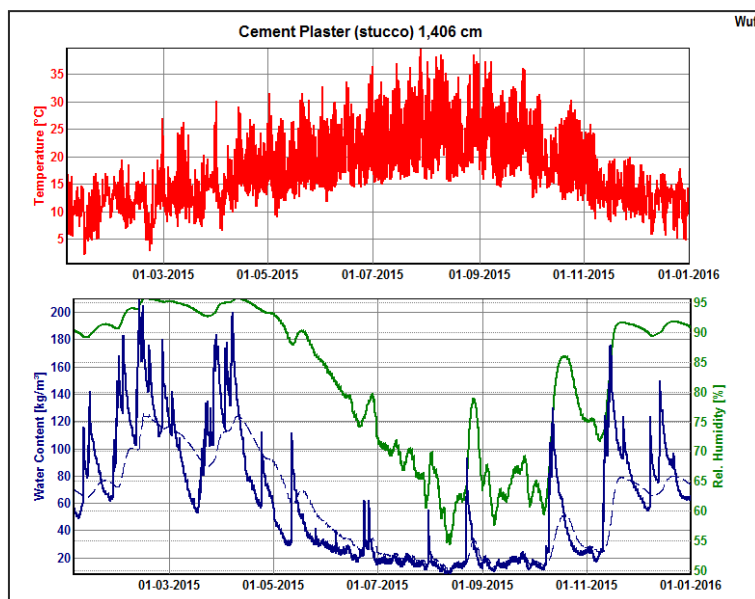


Figura 2.24 – Exemplo de resultados em filme do perfil da parede (WUFI Pro)

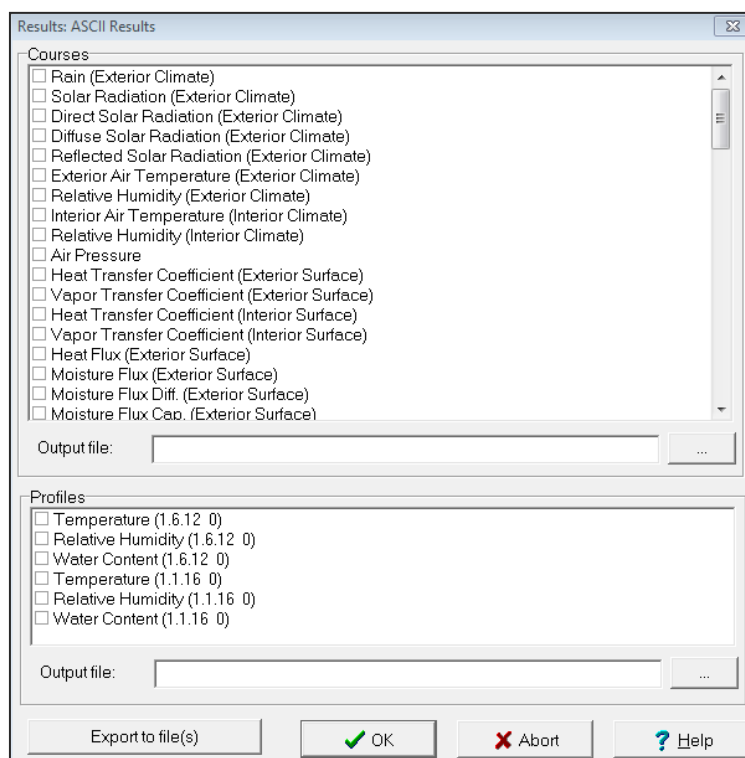
Utilizando este modo de visualização de resultados é possível utilizar a opção *create course*, que pode ser criada a partir de cada parte da grelha do elemento construtivo, e mostra a evolução dos parâmetros num gráfico em função do período de simulação (Figura 2.25).





**Figura 2.25 – Exemplo de resultados em formato *course* (WUFI Pro)**

Existe outro conjunto de parâmetros além dos que se podem visualizar nos resultados referidos, que podem ser exportados em ficheiros do tipo \*.asc (Figura 2.26).



**Figura 2.26 – Menu para exportação de resultados (WUFI Pro)**

## 2.5. Regras de concepção de paredes para evitar a ocorrência de condensações internas

Na presente dissertação foram utilizadas recomendações de origem francesa (NF P10-202-3 / DTU 20.1., 1994) que envolvem um conjunto de regras de concepção de paredes que podem ser aplicadas, de uma maneira geral, ao clima e soluções construtivas em Portugal. Deste modo pretende evitar-se que haja uma alteração das propriedades dos materiais, e consequentemente do seu desempenho, que resultam da presença de água proveniente da condensação de vapor de água no interior da parede.

Considera-se a existência de três diferentes elementos que são designados da seguinte forma:

- pano exterior da parede (M);
- isolamento térmico, incluindo eventuais espaços de ar (I);
- pano interior da parede, incluindo eventual barreira pára-vapor (P).

Cada elemento é caracterizado pela sua resistência térmica,  $R_T$  e resistência à difusão de vapor,  $R_D$ . Assim, a nomenclatura utilizada é a seguinte:

- $R_{TM}$  – Resistência térmica do pano exterior da parede;
- $R_{TI}$  – Resistência térmica do isolamento térmico, incluindo eventuais espaços de ar;
- $R_{TP}$  – Resistência térmica do pano interior da parede, incluindo eventual barreira pára-vapor;
- $R_{DI}$  – Resistência à difusão de vapor de água do isolamento térmico, incluindo eventuais espaços de ar;
- $R_{DP}$  – Resistência à difusão de vapor de água do pano interior da parede, incluindo eventual barreira pára-vapor.

O conjunto de regras recomendadas são as seguintes (NF P10-202-3 / DTU 20.1., 1994):

1. Regra para evitar a ocorrência de condensações na face interior do isolamento térmico:

$$R_{TI} > 3. R_{TP} \quad (2-49)$$

2. Regra para evitar a ocorrência de condensações na espessura do isolamento térmico, em locais de higrometria forte:

$$\frac{1}{R_{DP}} < 0,060. \text{g/m}^2 \cdot \text{h. mm. Hg} \quad (2-50)$$

$$\frac{1}{R_{DP}} < 1,25 \times 10^{-10} \text{ kg/}(\text{m}^2 \cdot \text{s. Pa}) \quad (2-51)$$

3. Regra para limitar os efeitos da condensação na face interior do pano exterior da parede:

$$3. R_{TM} > R_{TI} + R_{TP} \quad (2-52)$$

Caso 3.  $R_{TM} < R_{TI} + R_{TP}$  aplica-se uma das seguintes regras:

- 3.1. Limitação do fluxo de vapor:

se  $R_{TM} < 0,086 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$ :

$$\frac{1}{R_{DP} + R_{DI}} < 1,25 \times 10^{-10} \text{ kg/}(\text{m}^2 \cdot \text{s. Pa}) \quad (2-53)$$

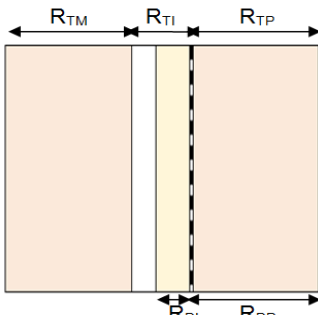
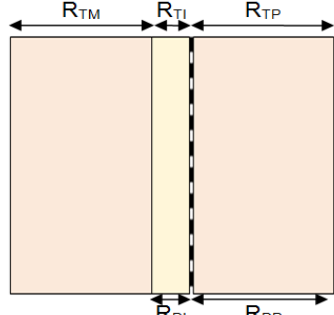
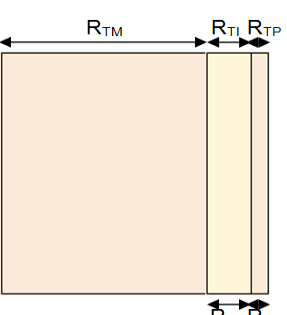
se zona muito fria:

$$\frac{1}{R_{DP} + R_{DI}} < 3,13 \times 10^{-11} \text{ kg/}(\text{m}^2 \cdot \text{s. Pa}) \quad (2-54)$$

- 3.2. Remoção da água condensada na base da parede.

A Tabela 2.3 resume as camadas referidas e as regras aplicáveis a cada tipo de parede. Este conjunto de regras tem como objectivo uma comparação com as simulações numéricas em regime variável de diferentes soluções construtivas de parede.

**Tabela 2.3 – Regras aplicáveis a cada disposição construtiva de parede dupla e simples, com isolamento pelo interior (Adaptado de: Couasnet,1990)**

Disposições Construtivas			
Regras Aplicáveis	1 3.1 ou 3.2	1 2 3.1	1 2 3.1



### **3. SIMULAÇÃO DE SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS DE PAREDE EM REGIME VARIÁVEL E ESTACIONÁRIO**

#### **3.1. Condições iniciais admitidas para as simulações em regime variável**

As seguintes opções foram assumidas para todas as simulações em regime variável que foram realizadas na presente dissertação:

- Considera-se que as paredes recebem uma chuva incidente correspondente a uma altura superior a 20m, que representam a quantidade de pluviosidade mais elevada.
- O clima exterior corresponde ao ficheiro climático de Lisboa;
- Os materiais possuem um teor de humidade inicial correspondente ao teor de humidade de referência,  $w_{80}$ ;
- O período de simulação é de 1 de Junho de 2012 a 1 de Janeiro de 2016, aproveitando um período inicial de Verão que permita uma convergência mais rápida do equilíbrio dinâmico do elemento construtivo.

#### **3.2. Simulação de diferentes factores em regime variável**

As simulações prévias funcionam como avaliação de um conjunto de variáveis do ambiente exterior, interior, e da constituição da parede, que permitem a determinação das opções que tornam mais gravosa a presença de humidade no elemento construtivo.

- A orientação da fachada implica uma combinação entre radiação solar, pluviosidade e vento incidente na fachada. Assim, foram simuladas cinco orientações possíveis: Norte, Sul, Este, Oeste e Sudoeste;
- Foram simuladas três tonalidades diferentes para o revestimento exterior, no sentido de avaliar os efeitos da variação do coeficiente de absorção de radiação,  $a_s$ : branco ( $a_s=0,2$ ), claro ( $a_s=0,4$ ), e escuro ( $a_s=0,6$ );
- Foram simuladas três espessuras possíveis para um pano de alvenaria de tijolo cerâmico de uma parede simples: 11cm, 15cm e 22cm;
- Foram simulados dois níveis diferentes de higrometria interior para a norma EN15026 e norma EN13788.

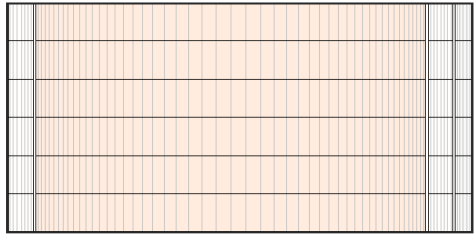
Os materiais utilizados nas simulações higrotérmicas e os seus parâmetros estão representados no Anexo B – Tabela 15. As características das simulações realizadas neste sub-capítulo estão representadas em Anexo D.

### 3.2.1. Análise de sensibilidade associada à alteração da orientação da fachada

Uma parede exterior de um edifício está exposta a um conjunto de variáveis climáticas, que influenciam as condições de temperatura e humidade relativa da superfície e do interior da parede. A análise de diferentes orientações implica considerar as características de cada orientação no que concerne à radiação incidente, pluviosidade e à velocidade e direcção do vento a que a parede está exposta.

No sentido de determinar qual a orientação que produz condições mais adversas para o nível de humidade relativa no interior da parede, foi realizada uma simulação numérica em regime variável numa parede simples rebocada de ambos os lados, caracterizada pela Tabela 3.1.

**Tabela 3.1 – Caracterização da solução construtiva utilizada na análise de diferentes orientações da fachada**

 <p>[1] [2] [1][3]</p>	<p>[1] – Reboco tradicional de argamassa de cimento e areia (1,5cm)</p> <p>[2] – Tijolo Cerâmico Furado (22cm)</p> <p>[3] – Estuque de gesso tradicional (1cm)</p>
Espessura Total [m]	22cm
U [W/m <sup>2</sup> .K]	1,32

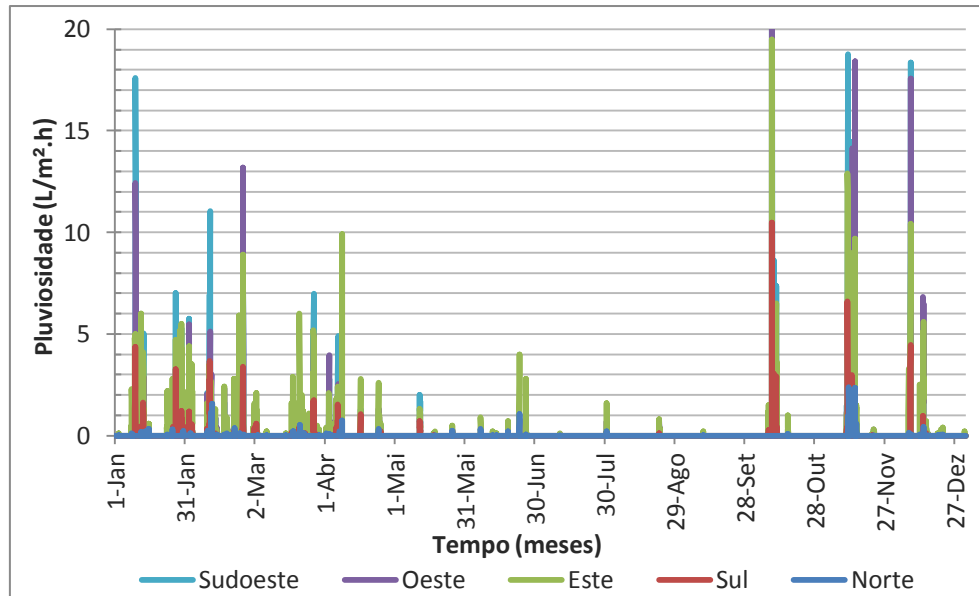
As orientações seleccionadas para a análise foram: Norte, Sul, Este, Oeste e Sudoeste. A escolha da direcção Sudoeste deve-se ao facto de estar sujeita à maior quantidade de precipitação, como está representado na análise climática da Figura 2.17. Nesta análise foi seleccionada uma tonalidade branca ( $a_s=0,2$ ) para o revestimento da fachada (Anexo D - Tabela 16).

#### 3.2.1.1. Efeitos das diferentes orientações de fachada

##### Face interior do reboco exterior

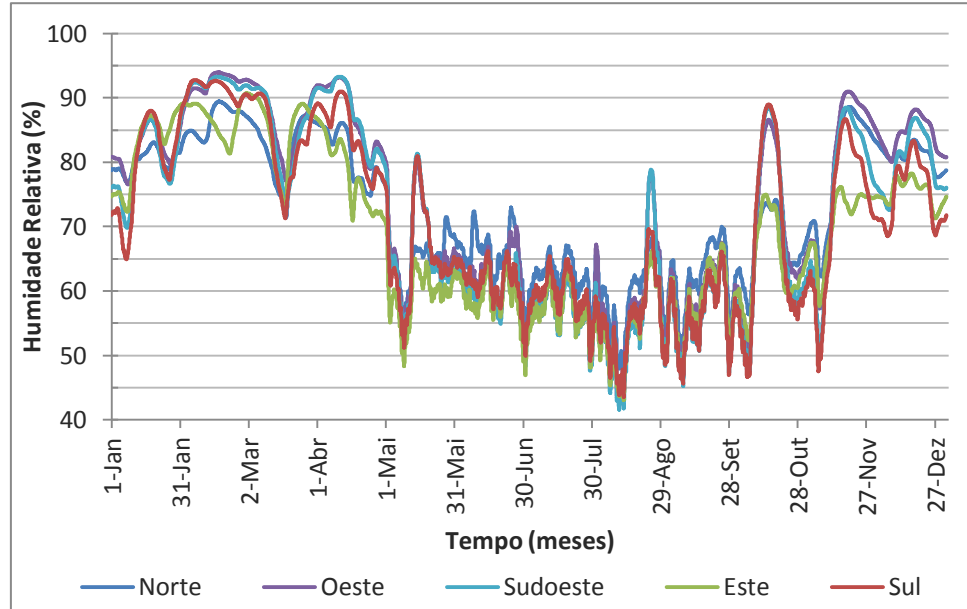
Inicialmente, a verificação dos efeitos das diferentes orientações da fachada passa pela verificação da face interior do reboco exterior. Nesta região ocorre uma grande flutuação da humidade relativa para cada orientação considerada (Figura 3.2). Deste modo, faz-se a análise da orientação mais condicionante na face interior do reboco exterior, tendo em conta

a sua influência durante o período que corresponde aos meses em que ocorrem os períodos de pluviosidade mais gravosos, entre Outubro e Maio (Figura 3.1).



**Figura 3.1 – Pluviosidade para diferentes orientações de parede**

Na Figura 3.2 está representada a humidade relativa na face interior do reboco exterior, resultante da pluviosidade que atinge a superfície da parede.

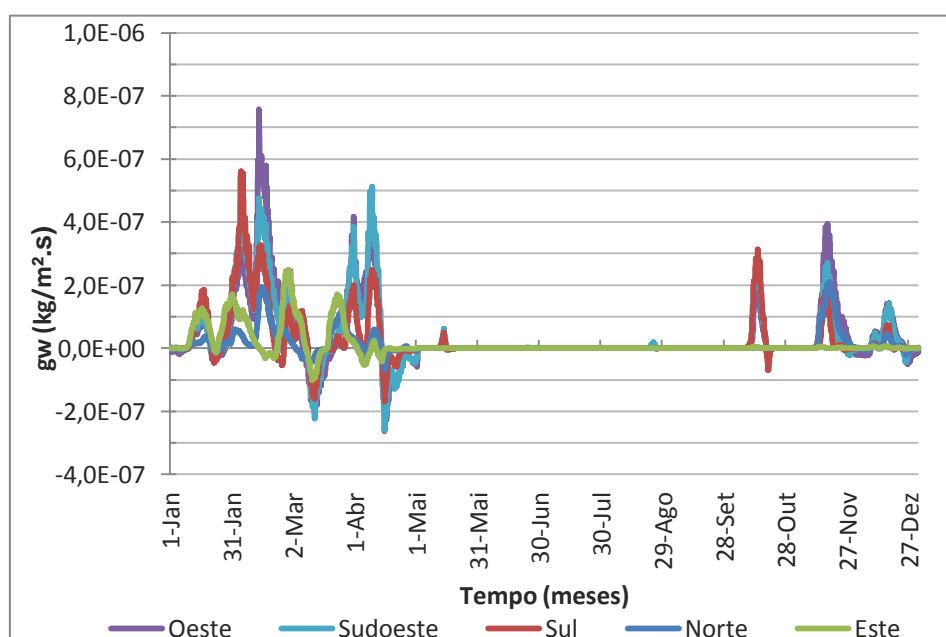


**Figura 3.2 - Variação da humidade relativa na face interior do reboco exterior para várias orientações da fachada em função do tempo (01-01-2015 a 1-01-2016)**

Verifica-se uma grande volatilidade no andamento dos gráficos de cada orientação dado que a pluviosidade atinge a superfície das paredes de diferentes orientações de forma alternada, devido ao vento, que altera tanto a direcção da pluviosidade como a condutância térmica superficial. Da avaliação do gráfico verifica-se que a humidade relativa é mais elevada nos

períodos de maior ocorrência de pluviosidade, e que as orientações afectadas de forma mais grave são as direcções Oeste e Sudoeste.

Analisando os fluxos de humidade por transporte capilar retirados do WUFI e representados na Figura 3.3, são visíveis os momentos do ano em que ocorrem os maiores fluxos de transporte de água por capilaridade, que correspondem à leitura de humidade relativa que se observa ao longo do ano. Os valores positivos representam um fluxo que atravessa o elemento construtivo no sentido positivo do eixo cartesiano (do exterior para o interior), e os fluxos negativos representam um fluxo que atravessa o elemento construtivo no sentido contrário ao eixo cartesiano (do interior para o exterior). Trata-se de uma região dominada pelos fluxos de humidade proveniente da chuva que migram pela camada de argamassa.



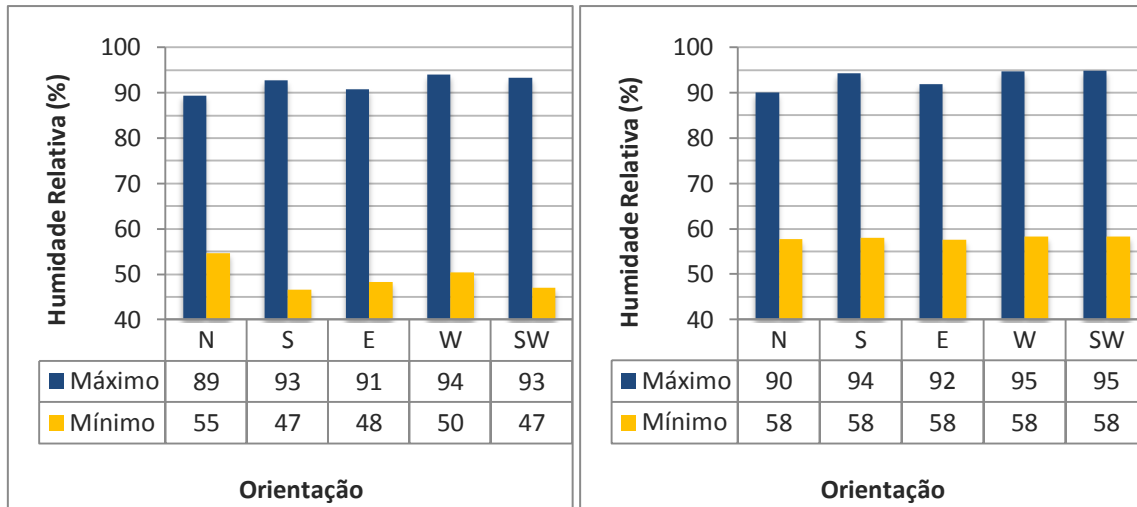
**Figura 3.3 – Fluxo de água transportada pelos capilares na face interior do reboco exterior, para diferentes orientações de parede**

Em conjunto com a pluviosidade, existem outros parâmetros superficiais da parede que influenciam a humidade relativa – o calor latente de evaporação ou condensação, a radiação solar incidente na fachada e a condutância térmica superficial.

No Anexo C estão representados um conjunto de gráficos onde se analisou o efeito dos parâmetros referidos. Da análise destes parâmetros verifica-se que a absorção de radiação é o factor que mais influência tem na humidade relativa. A ausência de absorção da radiação solar produz um aumento dos valores mínimos de humidade relativa para os 58%, resultantes de um abaixamento de temperatura da parede e uma pior capacidade de secagem, que corresponde aos momentos em que a parede não recebe pluviosidade. Este valor é o mesmo para todas as orientações (Figura 3.4). O aumento que se verifica nos valores máximos é ligeiramente inferior, dado que a pluviosidade se sobrepõe à ausência de



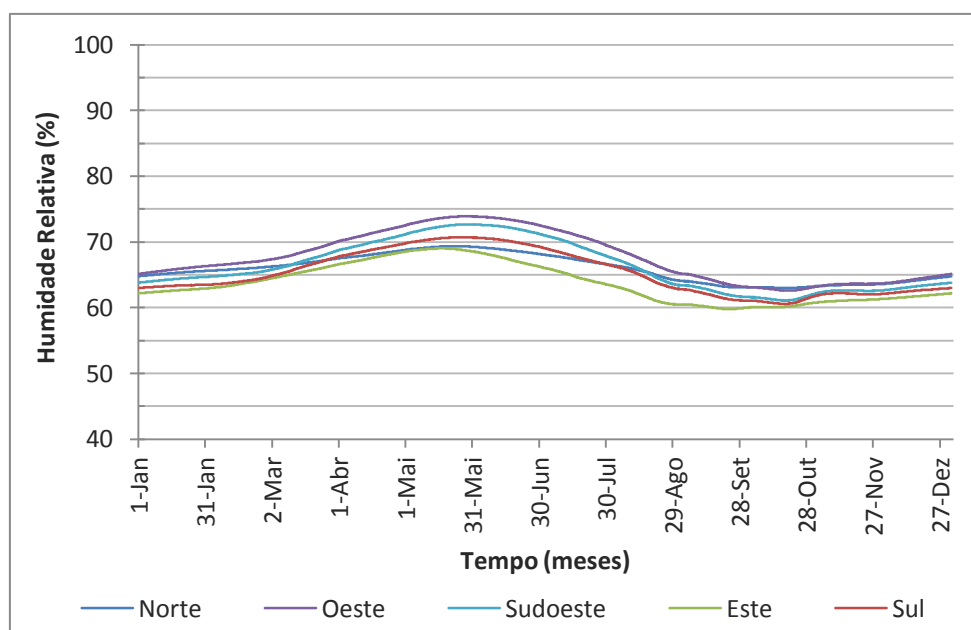
absorção de radiação solar em regiões mais próximas da superfície exterior da parede, como é o caso. Os resultados são semelhantes aos obtidos em (Jorne, 2010).



**Figura 3.4 – Valores máximos e mínimos de humidade relativa na face interior do reboco exterior, correspondentes a um período entre Outubro e Maio para a simulação base (à esquerda) e a simulação com coeficiente de absorção de radiação nulo (à direita)**

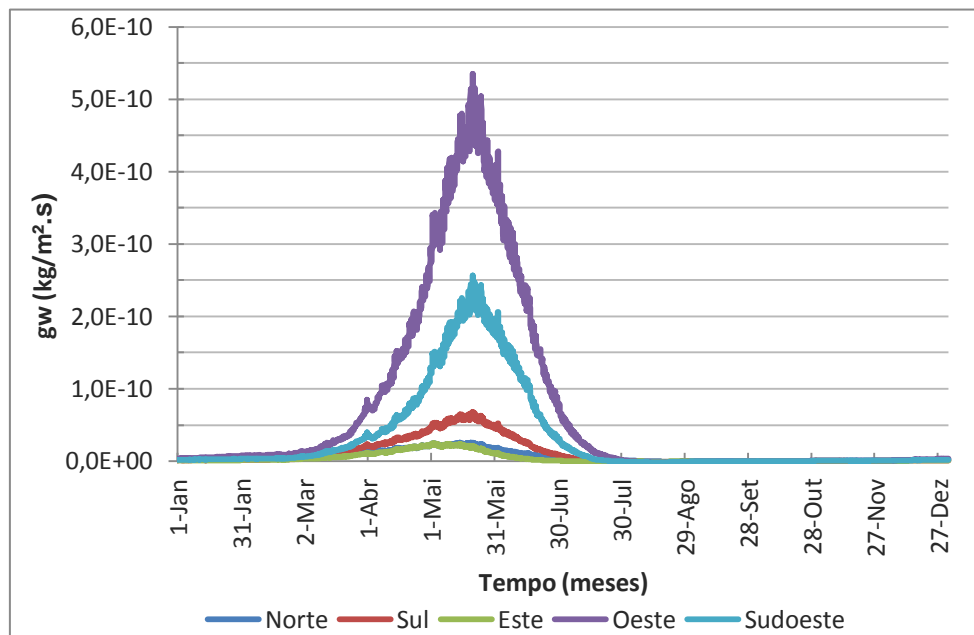
### Centro do pano de alvenaria

As condições observadas na camada de revestimento da parede vão influenciar aquilo que ocorre no interior do pano de alvenaria de tijolo cerâmico furado. Os resultados obtidos no centro da alvenaria estão representados na Figura 3.5. Nesta região verifica-se que a orientação Oeste produz os valores mais elevados de humidade relativa, com excepção para um curto período em que a orientação Norte os ultrapassa, durante Outubro e parte de Novembro.



**Figura 3.5 – Variação da humidade relativa no centro do pano de alvenaria de tijolo cerâmico furado para várias orientações de fachada em função do tempo (01-01-2015 a 01-01-2016)**

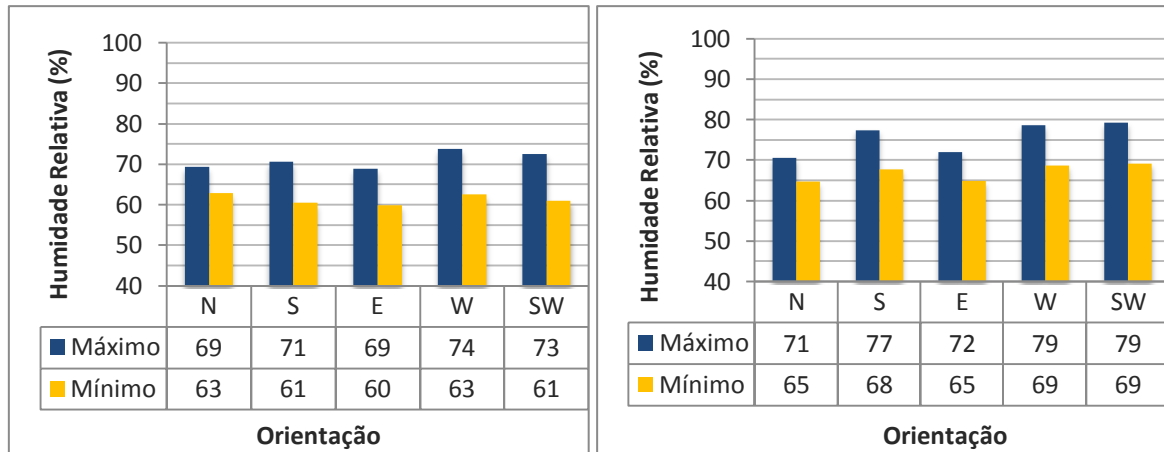
O andamento da humidade relativa ao longo do ano é correspondido pelos fluxos de humidade transportada por capilaridade até ao centro do elemento construtivo, onde se verificam as orientações dispostas na mesma ordem (Figura 3.6).



**Figura 3.6 – Fluxo de água transportada pelos capilares no centro do pano de alvenaria, para diferentes orientações de parede**

Neste caso, observa-se que a ordem de grandeza dos fluxos que ocorrem é muito inferior aos que se verificam na face interior do reboco exterior, na ordem do milhar. A relação aproximadamente exponencial entre o teor de humidade e o coeficiente de transporte líquido  $D_{ws}$ , resulta numa diminuição do fluxo de humidade à medida que o teor de humidade diminui na parede, em profundidade.

Na Figura 3.7 estão representadas as humidades relativas para cada orientação com a presença ou ausência de absorção de radiação solar, sendo possível distinguir as orientações mais expostas à radiação solar directa – Sul, Este, Oeste e Sudoeste – e a orientação Norte, que não sofre uma grande influência da radiação solar directa.



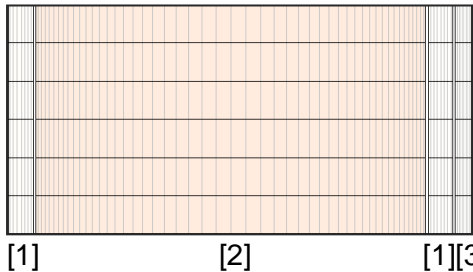
**Figura 3.7 - Valores máximos e mínimos de humidade relativa no centro do pano de alvenaria, correspondentes a um período entre Outubro e Maio para a simulação base (à esquerda) e a simulação com coeficiente de absorção de radiação nulo (à direita)**

Assim, ocorrem maiores diferenças nas fachadas orientadas para direcções com maior incidência de radiação solar, comparativamente com as orientações que recebem menos radiação, que podem ser observadas na análise climática do ficheiro de Lisboa (Figura 2.17). No caso de um coeficiente de absorção de radiação nulo, dá-se um aumento da humidade relativa, resultante de uma menor capacidade de secagem do material. Em todos os casos, a orientação Oeste apresenta os valores mais elevados, ou equivalentes aos da direcção Sudoeste. No centro do pano de alvenaria há uma menor influência da pluviosidade, havendo alterações dos valores máximos.

### 3.2.2. Análise de sensibilidade associada à alteração da tonalidade do revestimento exterior

A tonalidade de uma fachada tem influência na temperatura superficial de uma parede exterior. Para determinar a tonalidade mais desfavorável, foram realizadas simulações referentes a três tipos diferentes de tonalidade da fachada da parede, realizadas numa parede simples, rebocada de ambos os lados, com um pano de alvenaria de tijolo cerâmico com 22cm de espessura, sem isolamento térmico. A orientação escolhida para esta simulação é Oeste, como está referido em Anexo D - Tabela 17.

**Tabela 3.2 – Caracterização da solução construtiva utilizada na análise de diferentes tonalidades da fachada**

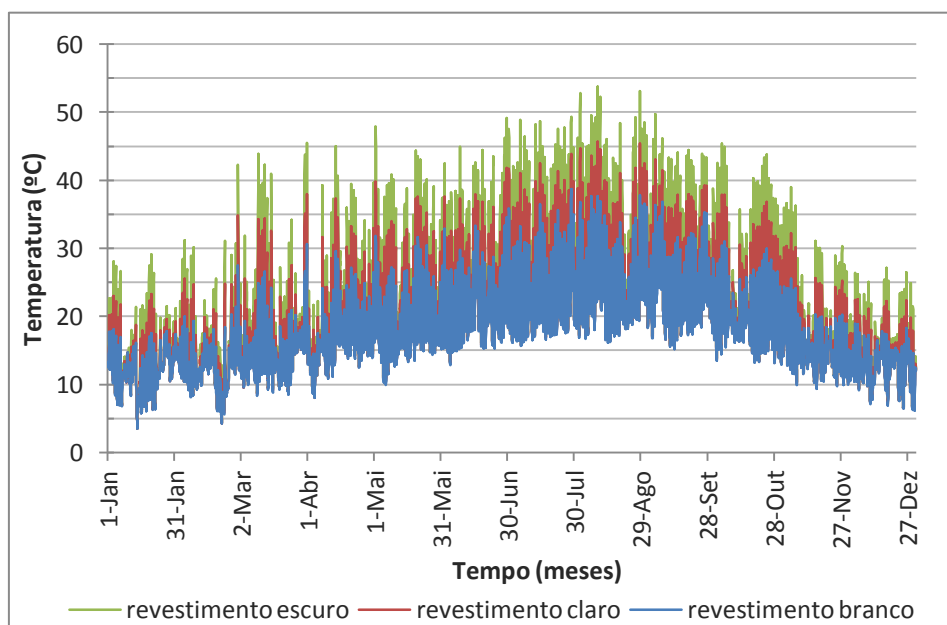
		<p>[1] – Reboco tradicional de argamassa de cimento e areia (1,5cm)</p> <p>[2] – Tijolo Cerâmico Furado (22cm)</p> <p>[3] – Estuque de gesso tradicional (1cm)</p>
Espessura [m]		22cm
U [W/m <sup>2</sup> .K]		1,32

Alterou-se a tonalidade do revestimento entre branco e escuro, variando os valores do coeficiente de absorção de radiação,  $a_s$ , entre 0.2, 0.4, e 0.6.

### **3.2.2.1. Efeitos das diferentes tonalidades do revestimento**

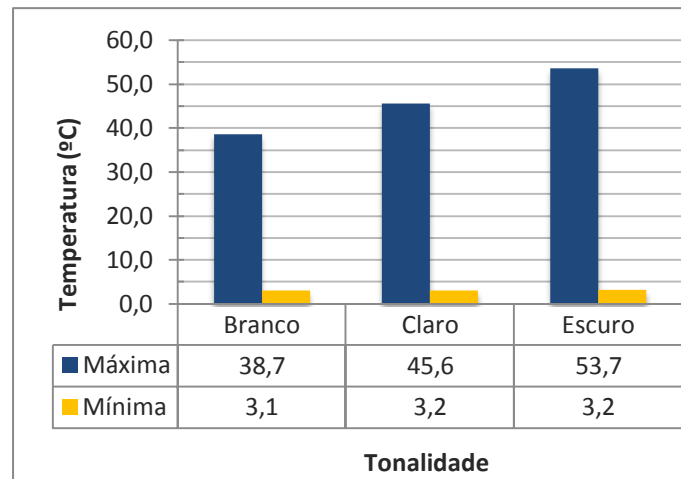
#### **Superfície exterior da parede**

Na Figura 3.8 estão representadas as temperaturas da superfície exterior da parede para as três tonalidades simuladas.



**Figura 3.8 – Temperatura da superfície exterior da parede para três tonalidades diferentes**

O gráfico indica que um revestimento progressivamente mais escuro conduz a temperaturas mais elevadas na superfície externa da parede. A Figura 3.9 apresenta os valores máximos e mínimos da temperatura para cada tonalidade, correspondentes a todo o ano.



**Figura 3.9 – Temperatura da superfície exterior da parede para três tonalidades diferentes**

De referir também que a temperatura mínima na face da parede se mantém semelhante para as três tonalidades. Estes valores mínimos correspondem ao dia 14 de Janeiro do ano de referência pelas 8 horas, onde se observa que não ocorre incidência de radiação solar directa, segundo o ficheiro climático.

Dado que os ensaios se limitam a alterar o valor do coeficiente de absorção de radiação solar,  $a_s$ , verifica-se que há uma associação deste coeficiente à temperatura, pela equação 2-41.

$$q_{\text{solar}} = a_s I$$

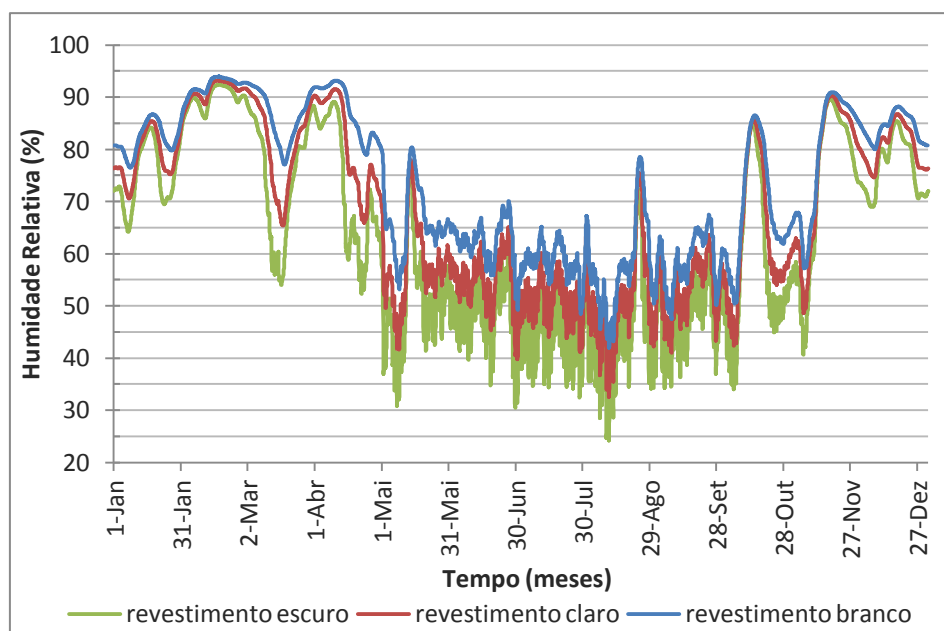
Sendo as simulações realizadas para a mesma orientação, existe uma intensidade de radiação solar,  $I$ , equivalente e a mesma condutância térmica  $h_{\text{ext}}$ , o que faz com que a única forma de aumentar o fluxo de calor proveniente da radiação seja o aumento do coeficiente de absorção. O aumento de  $a_s$  provoca o aumento da temperatura superficial exterior pela equação 2-42, o que justifica a observação realizada na Figura 3.8.

$$T_{\text{se}} = T_e + \frac{a_s \cdot I}{h_{\text{ext}}}$$

### **Face interior do reboco exterior**

Na Figura 3.10 está representada a humidade relativa na face interior do reboco exterior, para cada um dos coeficientes de absorção.

### Análise Comparativa de Diferentes Modelos de Simulação Numérica na Avaliação da Ocorrência de Condensações Internas



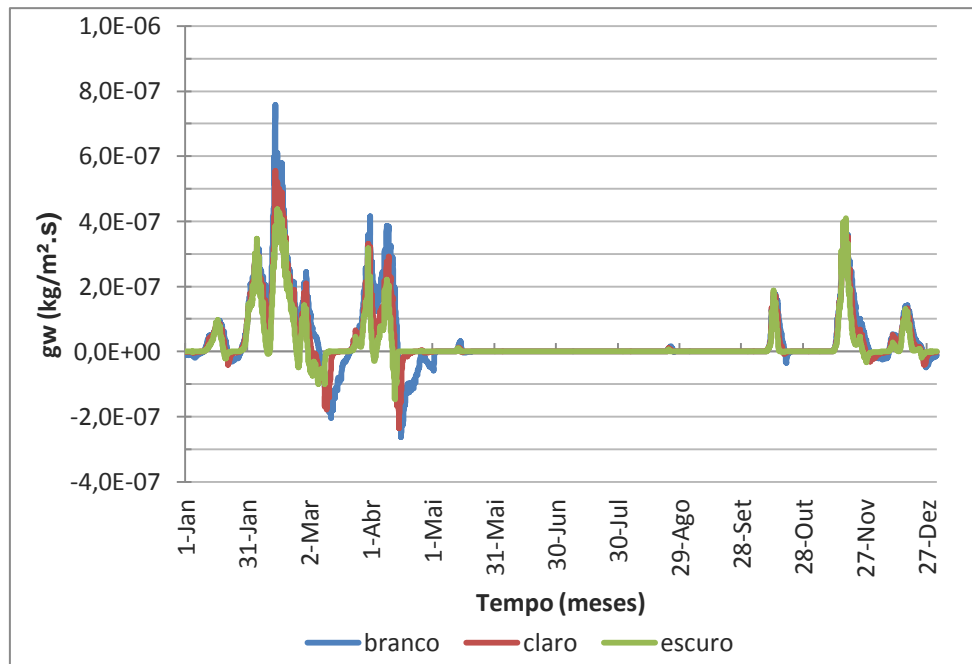
**Figura 3.10 – Humidade relativa no reboco exterior para três tonalidades de revestimento exterior: branco, claro, e escuro**

Observa-se que, à medida que aumenta o coeficiente de absorção de radiação solar, os valores de humidade relativa atingem valores mais baixos na fase de secagem, decorrentes do aumento de temperatura da camada de reboco exterior por condução, dado que o  $q_{\text{solar}}$  na envolvente exterior é superior quando o revestimento é escuro. A expressão que traduz a condução de calor entre as camadas da parede é a seguinte:

$$q = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx}$$

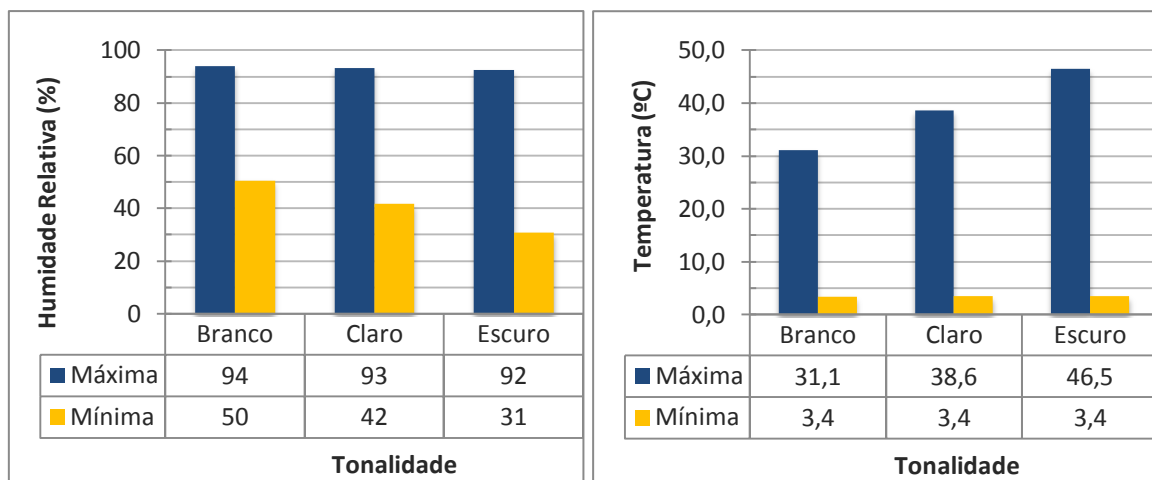
Para a mesma condutibilidade térmica da camada de reboco, quanto maior é a diferença de temperatura entre a sua superfície exterior e a interface interior, maior será o fluxo de calor. Assim, quanto mais elevado for o coeficiente de absorção de radiação solar, maior será a temperatura ao longo da parede, acompanhada de uma maior taxa de variação da temperatura com a espessura ( $dT/dx$ ), entre a temperatura superficial exterior e a interface entre o reboco e a alvenaria.

Os fluxos de transporte de água pelos capilares na face interior do reboco exterior (Figura 3.11) indicam que os valores são mais elevados quanto mais clara é a tonalidade utilizada no revestimento, o que está de acordo com as humidades relativas analisadas anteriormente.



**Figura 3.11 – Fluxo de água transportada pelos capilares no na face interior do reboco exterior, para diferentes tonalidades do revestimento**

As humidades relativas máximas e mínimas que ocorrem entre Outubro e Maio estão representadas na Figura 3.12.



**Figura 3.12 – Valores de humidade relativa e temperatura máximos e mínimos na face interior do reboco exterior, para diferentes tonalidades**

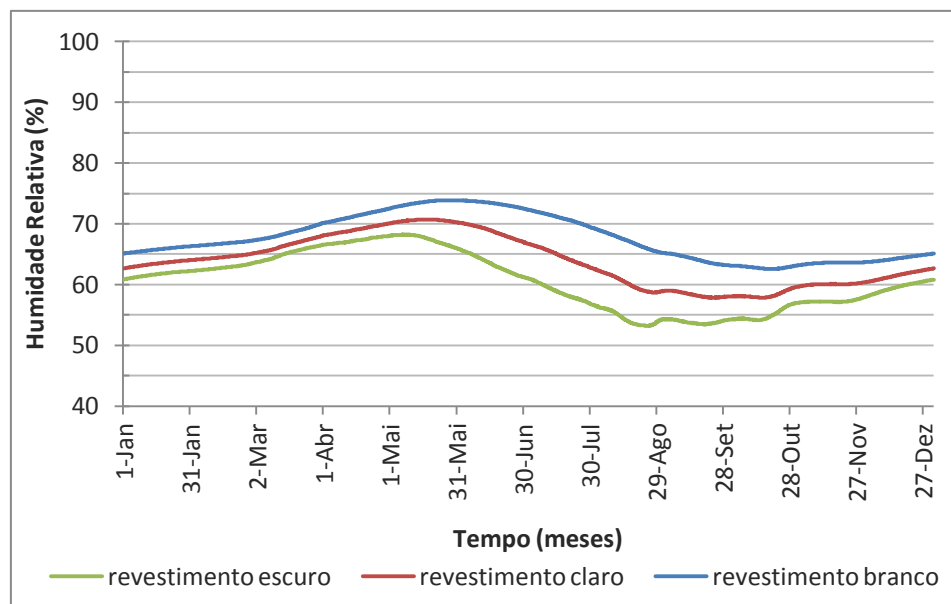
A humidade relativa tem uma variação pequena causada pela pluviosidade, que tem uma grande influência na camada de reboco exterior, algo que faz com que os efeitos da temperatura não se tornem mensuráveis. Os valores mínimos possuem uma variação mais acentuada, pois dão-se em períodos em que ocorre a secagem do material.

Outro dado importante é a comparação entre a diminuição da humidade relativa com o aumento da temperatura correspondente à mudança de tonalidade, na interface entre o reboco exterior e a alvenaria de tijolo cerâmico. Uma parede com revestimento branco

possui valores de humidade relativa condicionantes, no entanto há uma diferença muito pequena entre os valores máximos.

### Centro do pano de alvenaria

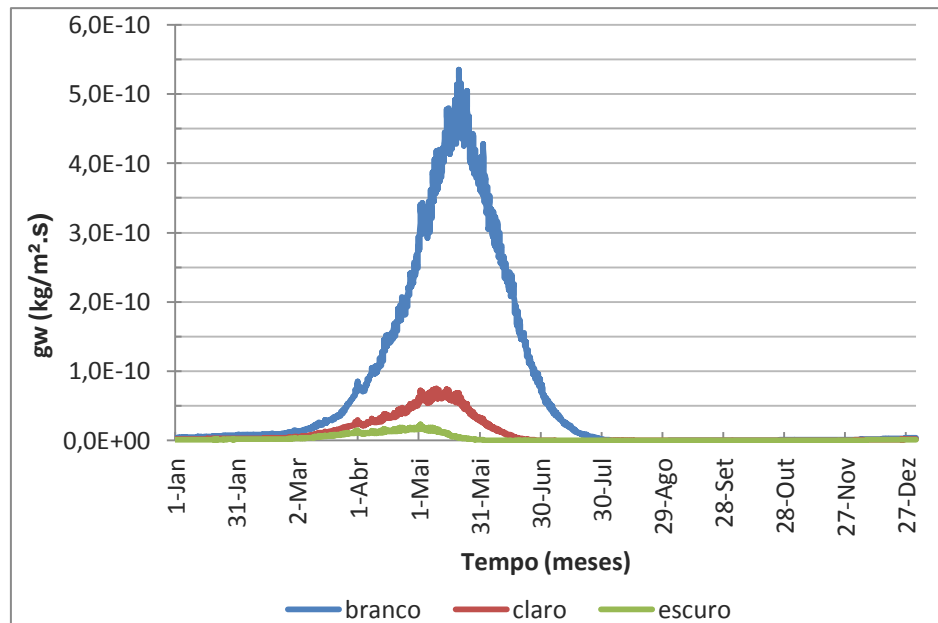
A Figura 3.13 representa a humidade relativa que ocorre no centro do pano de alvenaria, com a alteração do coeficiente de absorção de radiação,  $a_s$ .



**Figura 3.13 - Humidade relativa no pano de alvenaria de tijolo cerâmico furado para três tonalidades de revestimento exterior: branco, claro, e escuro**

No centro do pano de alvenaria observam-se valores mais baixos de humidade relativa à medida que aumenta a absorção de radiação solar da fachada, acompanhada simultaneamente de um desfasamento entre os pontos máximos de humidade relativa para cada tonalidade. O factor que define este desfasamento é confirmado ao analisar os fluxos de transporte capilar de água no centro da alvenaria, na Figura 3.14.





**Figura 3.14 - Fluxo de água transportada pelos capilares no centro do pano de alvenaria, para diferentes tonalidades do revestimento**

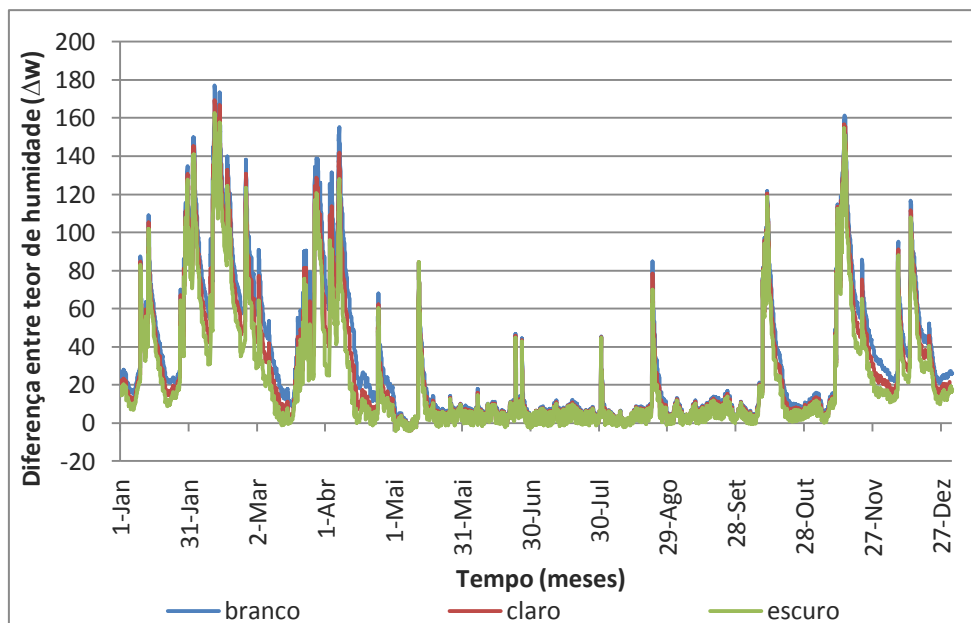
Quanto maior é a temperatura superficial da parede, decorrente da radiação solar, maior será a temperatura que a parede atinge, por condução de calor. Deste modo, quanto maior é a temperatura, menor será a humidade relativa na parede, o que implica um menor teor de humidade, de acordo com a *curva de armazenamento de humidade*. Trata-se de uma localização mais interior na parede, onde a pluviosidade já não possui um efeito tão acentuado como no reboco exterior.

Como enunciado pela equação 2-34, dado que o coeficiente de transporte de água líquida é sempre positivo, para haver um fluxo de humidade positivo (que se desloque no sentido positivo do eixo cartesiano), é necessário que a taxa de variação do teor de humidade seja negativa, ou seja, o material tem de estar mais seco em profundidade para que haja migração de humidade por difusão superficial.

$$g_w = -D_w(w) \cdot \frac{dw}{dx}$$

As diferenças de teor de humidade, entre a face exterior e o centro do pano de alvenaria, que conduzem aos fluxos de humidade apresentados na Figura 3.14, no centro do pano de alvenaria, estão representadas na Figura 3.15.

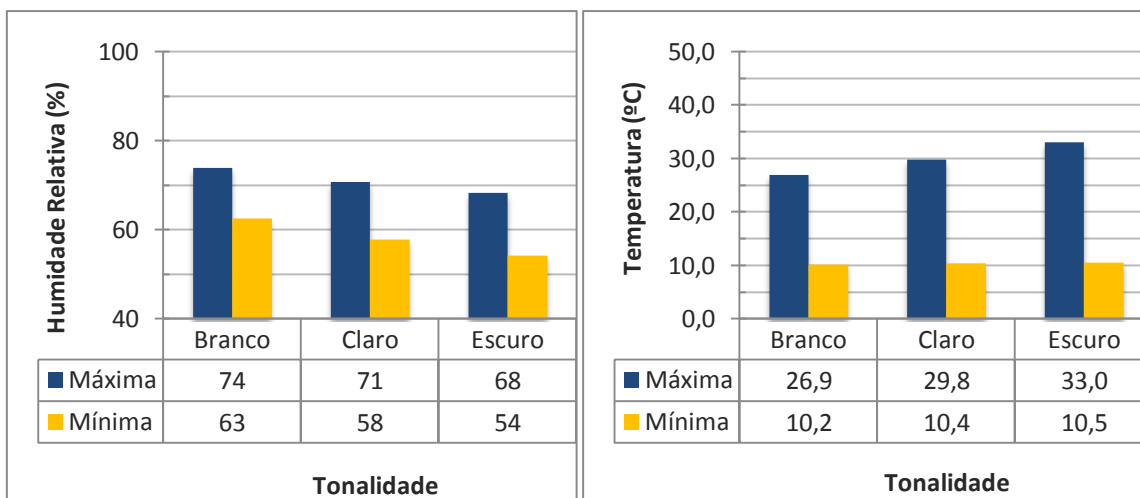
**Análise Comparativa de Diferentes Modelos de Simulação Numérica na Avaliação da Ocorrência de Condensações Internas**



**Figura 3.15 – Diferença de teor de humidade entre a face exterior do pano de alvenaria e o seu centro**

À tonalidade branca estão associadas as maiores diferenças de teor de humidade, seguida da tonalidade clara e da tonalidade escura. Assim, verifica-se que está associado um fluxo menor ao revestimento escuro, o que leva à ocorrência de um pico de humidade relativa mais baixo que as restantes tonalidades, e que é o primeiro a ocorrer. Segue-se um pico intermédio e um pico máximo de humidade relativa, causados por um fluxo intermédio e por um fluxo máximo, respectivamente. Assim, quanto mais elevado for o fluxo de humidade, maior será a humidade relativa atingida, e mais tempo levará a que esse valor máximo seja atingido.

Os valores máximos de humidade relativa e temperatura no centro do pano de alvenaria de tijolo cerâmico, entre Outubro e Maio, podem ser observados na Figura 3.16.



**Figura 3.16 – Valores de humidade relativa e temperatura máximos e mínimos no centro do pano de alvenaria de tijolo cerâmico, para diferentes tonalidades**

Nestes dados verifica-se que há uma menor influência da pluviosidade, com um decréscimo mais acentuado dos valores máximos de humidade relativa, comparativamente com a face interior do reboco exterior, que acompanham o aumento das temperaturas à medida que o revestimento exterior escurece.

### 3.2.3. Análise de sensibilidade associada à alteração da espessura do pano de alvenaria

A variação da espessura de um pano de alvenaria pode representar um maior ou menor risco de condensações internas, dado que funciona como uma barreira à humidade proveniente da precipitação, e à sua migração pela parede. Para determinar a espessura do pano de alvenaria de tijolo cerâmico furado que conduz aos valores de humidade relativa mais elevados na parede, foi realizada uma simulação com uma solução construtiva de parede simples sem isolamento térmico e com reboco tradicional de ambos os lados, orientada a Oeste, com a alteração da espessura do pano de alvenaria entre 11, 15 e 22cm. A solução construtiva está caracterizada na Tabela 3.3.

**Tabela 3.3 – Caracterização das soluções construtivas utilizadas na análise de diferentes espessuras**

<p>[1] [2] [1][3]</p>	<p>[1] – Reboco tradicional de argamassa de cimento e areia (1,5cm)</p> <p>[2] – Tijolo Cerâmico Furado (11/15/22cm)</p> <p>[3] – Estuque de gesso tradicional (1cm)</p>
Espessura Total[m]	15/19/26cm
U [W/m <sup>2</sup> .K]	2,0/1,6/1,3W/m <sup>2</sup> .K

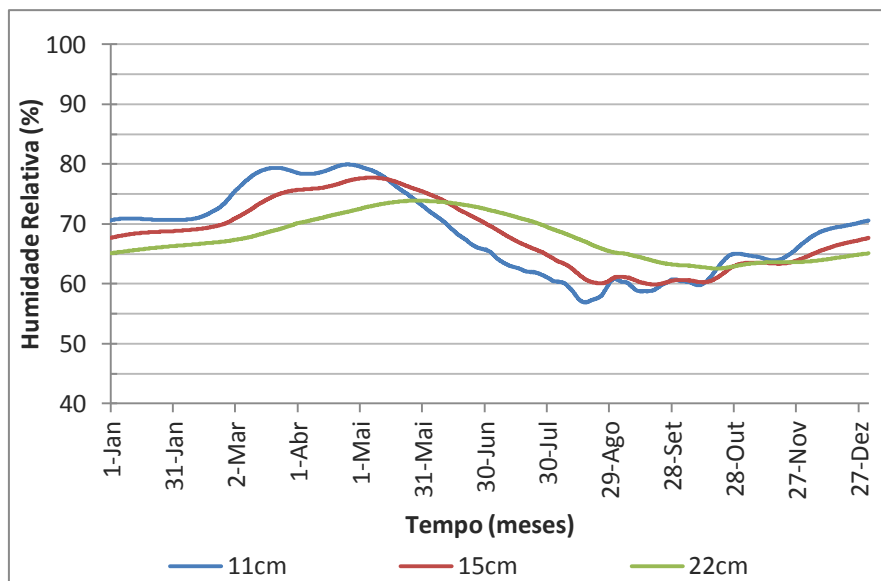
As características das simulações realizadas neste sub-capítulo estão representadas no Anexo D - Tabela 18, onde se regista uma orientação virada a Oeste e uma tonalidade branca como opções tomadas para esta simulação.

#### 3.2.3.1. Efeitos das diferentes espessuras do pano de alvenaria

##### Centro do pano de alvenaria

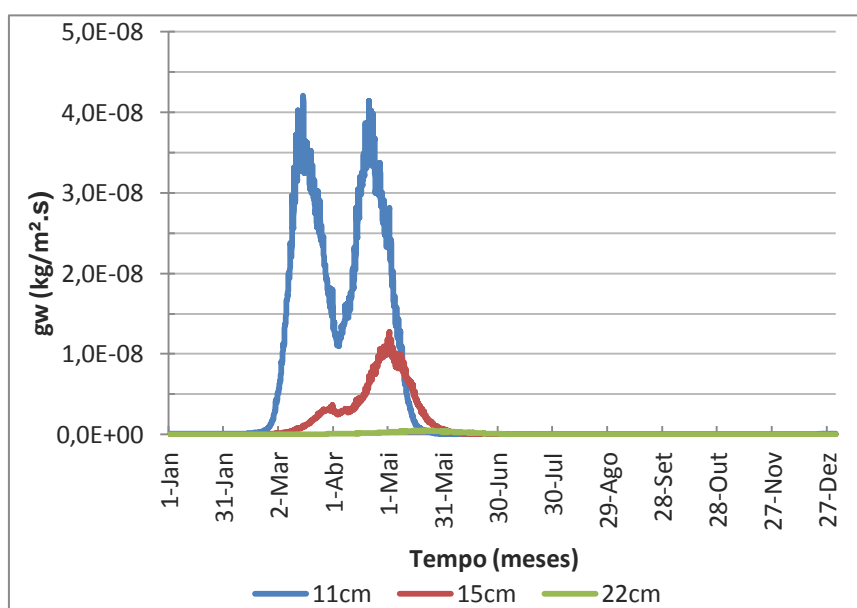
O comportamento da solução construtiva com a alteração da espessura do pano de alvenaria de tijolo cerâmico furado provoca as condições de humidade relativa no centro da camada de alvenaria correspondentes às apresentadas na Figura 3.17.

**Análise Comparativa de Diferentes Modelos de Simulação Numérica na Avaliação da Ocorrência de Condensações Internas**



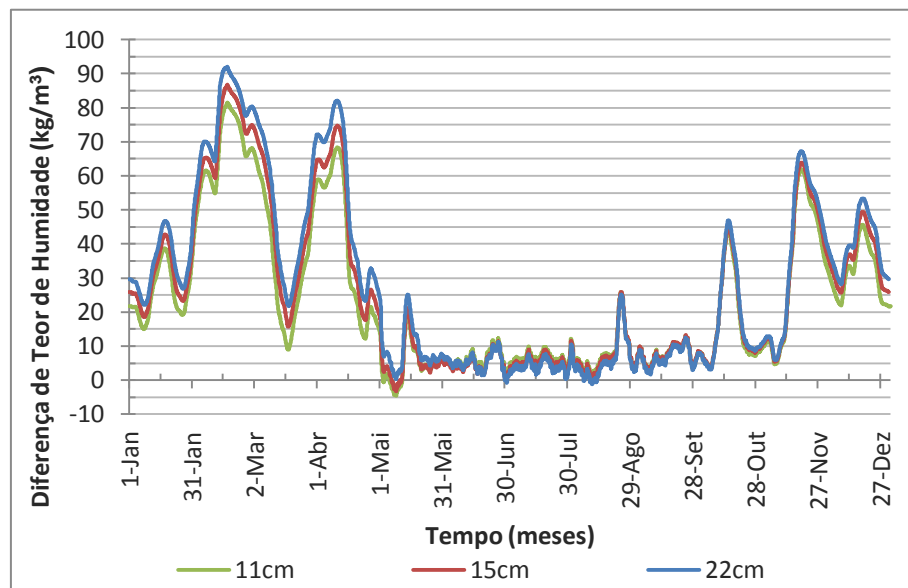
**Figura 3.17 – Humidade relativa no pano de alvenaria de tijolo furado para diferentes espessuras de alvenaria em função do tempo (01-01-2015 a 31-12-2015)**

No centro do pano de alvenaria observam-se valores mais elevados de humidade relativa para uma espessura de 11cm, seguidos da parede de 15cm e finalmente de 22cm, para um período de tempo entre Janeiro e meio do mês de Maio, onde se observa o início da fase de secagem que se dá no período de Verão. No início de Novembro, a humidade retoma a fase de crescimento que corresponde ao período de Inverno. Simultaneamente, regista-se um desfasamento entre os valores máximos registados nas três espessuras simuladas, e uma diminuição progressiva da flutuação de humidade relativa, à medida que a espessura aumenta. A Figura 3.18 representa os fluxos de humidade que migram pelos capilares, e que encaixam nas linhas de humidade relativa já abordadas na Figura 3.17.



**Figura 3.18 - Fluxo de água transportada pelos capilares no centro do pano de alvenaria, para diferentes espessuras do pano de alvenaria**

As diferentes espessuras de alvenaria ensaiadas são compostas pelo mesmo material, possuindo os mesmos coeficientes de transporte líquido. Em conjunto com este aspecto, verifica-se que a avaliação é realizada relativamente às distâncias entre a face exterior da alvenaria e o seu centro, ao contrário dos casos anteriores. Deste modo, a variação da espessura altera a taxa de variação de teor de humidade,  $dw/dx$ , da equação 2-34. Assim, quanto menor for a espessura, mais elevada será a taxa de variação, acompanhada por uma menor diferença de teor de humidade entre a face interior da argamassa e o centro da alvenaria (Figura 3.19).

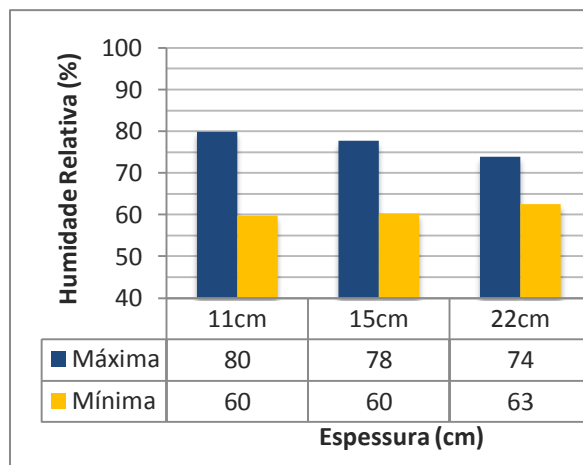


**Figura 3.19 – Diferença entre o teor de humidade entre a face interior da camada de argamassa e o centro do pano de alvenaria, para o período de um ano**

As diferenças encontradas na figura representam que, para espessuras maiores, a diferença será maior entre a face exterior da alvenaria e o seu centro, nos meses com maior pluviosidade. As flutuações que se verificam nas alvenarias mais finas, ao contrário das espessuras mais elevadas, significam que há uma maior sensibilidade do centro do pano de alvenaria relativamente aos fenómenos que afectam a superfície da parede.

Na Figura 3.20 estão representados os valores extremos que ocorrem no período entre Outubro e Maio, para as três espessuras consideradas.

## Análise Comparativa de Diferentes Modelos de Simulação Numérica na Avaliação da Ocorrência de Condensações Internas



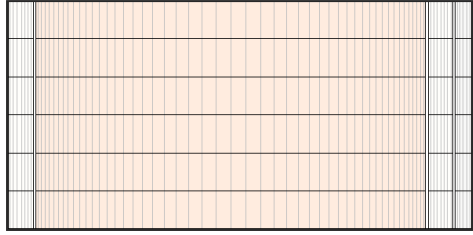
**Figura 3.20 – Valores extremos de humidade relativa no centro do pano de alvenaria de tijolo cerâmico, entre Outubro e Maio, para diferentes espessuras**

Verifica-se que o valor máximo atingido em cada espessura é progressivamente mais baixo, à medida que aumenta a espessura do pano de alvenaria, e que os valores mínimos tendem a aumentar na mesma medida, diminuindo a amplitude de humidade relativa. Do mesmo modo que o humedecimento do material é mais demorado no caso de espessuras maiores, o mesmo acontece quando se dá a fase de secagem, o que explica esta menor amplitude de humidade relativa.

### 3.2.4. Análise de sensibilidade associada à alteração das condições do ambiente interior

As normas EN13788 e EN15026 são duas opções possíveis para a definição das condições do ambiente interior. No sentido de determinar os efeitos que ambas produzem numa solução construtiva, e qual de ambas provoca condições mais favoráveis à ocorrência de condensações internas, foram simuladas numa solução construtiva de parede simples de alvenaria de tijolo cerâmico furado com reboco tradicional de ambos os lados, caracterizada na Tabela 3.4.

**Tabela 3.4 – Caracterização da solução construtiva utilizada na análise das Normas que definem o ambiente interior**

 <p>[1]                      [2]                      [1][3]</p>	<p>[1] – Reboco tradicional de argamassa de cimento e areia (1,5cm)</p> <p>[2] – Tijolo Cerâmico Furado (22cm)</p> <p>[3] – Estuque de gesso tradicional (1cm)</p>
Espessura [m]	22cm
U [W/m <sup>2</sup> .K]	1,32

As opções tomadas neste conjunto de simulações estão registadas no Anexo D - Tabela 19 e foram as seguintes:

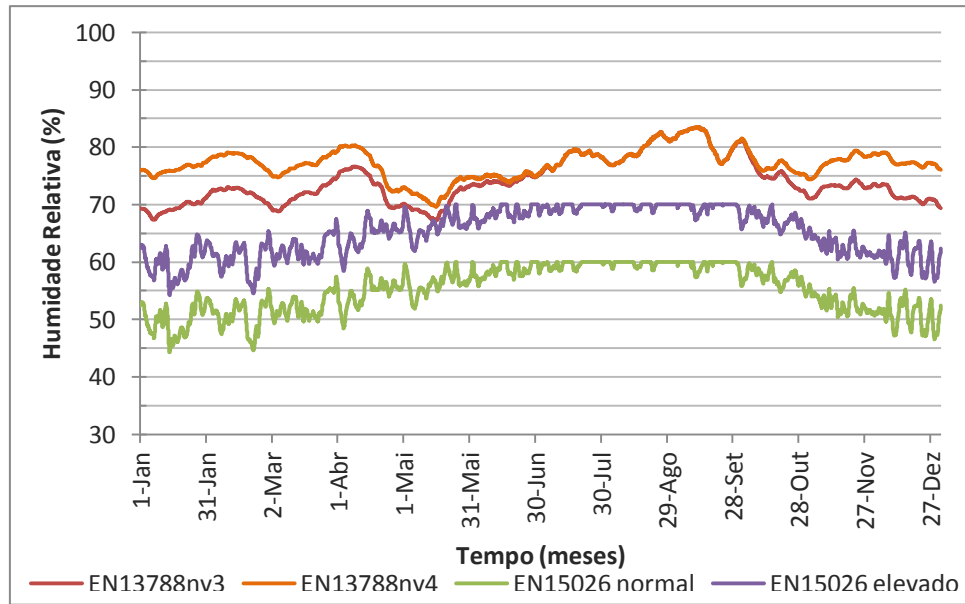
- Norma EN13788:
  - Temperatura interior: 18°C;
  - Higrometria Interior: Níveis 3 e 4.
- Norma EN15026:
  - Normal moisture load;
  - High moisture load.

#### **3.2.4.1. Efeitos dos diferentes tipos de ambiente interior**

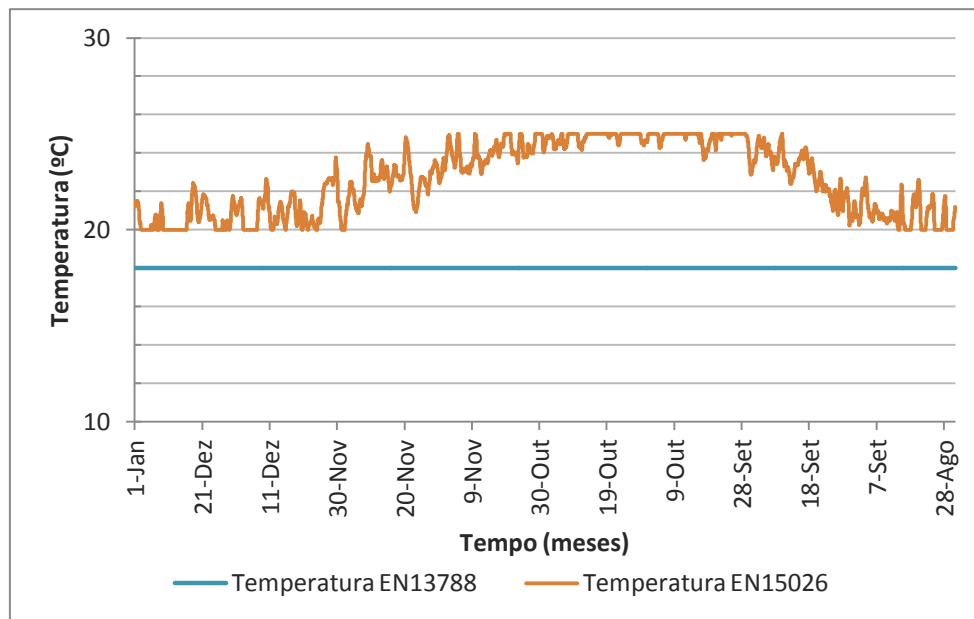
##### **Ambiente Interior**

Na Figura 3.21 está representado o andamento da humidade relativa do ambiente interior, determinada pelas normas EN13788 e EN15026, para dois níveis distintos de humidade. Na Figura 3.22 estão representadas as temperaturas para ambas as normas.

**Análise Comparativa de Diferentes Modelos de Simulação Numérica na Avaliação da Ocorrência de Condensações Internas**



**Figura 3.21 – Humidade relativas do ambiente interior correspondentes às normas EN15026 (Normal e Elevado) e EN13788 (Níveis 3 e 4)**



**Figura 3.22 – Temperaturas do ambiente interior correspondentes às normas EN15026 e EN13788**

De acordo com a norma EN13788, foram seleccionados os níveis 3 e 4 das classes de humidade interior presentes no capítulo 2.4.4.3, no sentido de simular um ambiente não sobreocupado e um ambiente sobreocupado. Este tipo de ambientes está representado na Tabela 2.2 e Figura 2.18, e correspondem ao Anexo A da norma EN ISO 13788. Para a norma EN15026 foram introduzidos os níveis de humidade normal e elevado. A temperatura escolhida para a norma EN13788 é de 18°C.

Verifica-se, pelos resultados das simulações da norma EN13788, que os dois níveis de humidade interior se igualam, em valores de humidade relativa, entre os dias 8 de Julho e



23 de Setembro. Este facto deve-se à forma como são calculados estes valores na simulação numérica em regime variável. O WUFI efectua um cálculo que não considera a média mensal do respectivo mês, mas uma média individual e centrada para cada dia, considerando um igual período de tempo anterior e posterior a essa data.

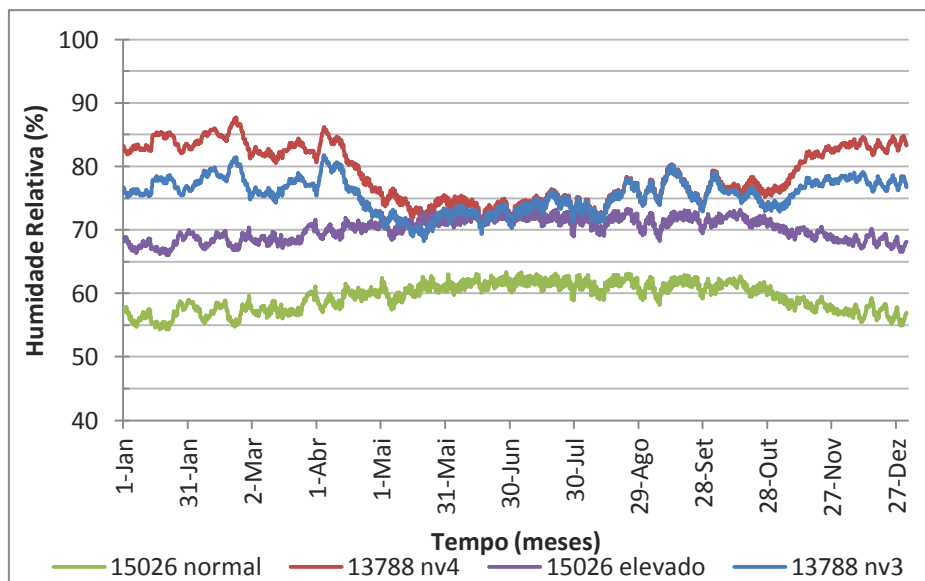
Isto explica o facto de ocorrerem variações no valor de humidade relativa do ambiente interior nos dias antecedentes e seguintes ao período em que os valores são iguais, e que são referentes ao mesmo mês. Esta situação não ocorreria caso os valores médios mensais fossem relativos exclusivamente a cada mês, dado que não haveria variação da temperatura nem a variação do suplemento de humidade absoluta,  $\delta N$ , abordado no capítulo 2.4.4.3.

Os resultados segundo a norma EN15026 diferenciam-se pelo facto de haver uma translação vertical de 10% da humidade relativa do ambiente interior, que representa a diferença entre as cargas de humidade elevada e normal, e de haver humidades relativas mais baixas nos meses de Inverno em contraponto com os meses de Verão, o que é irrealista relativamente ao que se passa nas habitações em Portugal. No ábaco da Figura 2.19, que relaciona a humidade relativa interior com a temperatura externa, observa-se que para temperaturas exteriores menores, menor é também a humidade relativa interna. A norma EN13788 apresenta os valores mais elevados para o ambiente interior para as duas cargas de humidade, em comparação com a norma EN15026. Seguidamente é analisado o reboco interior e o centro do pano de alvenaria.

### **Face interior do reboco interior**

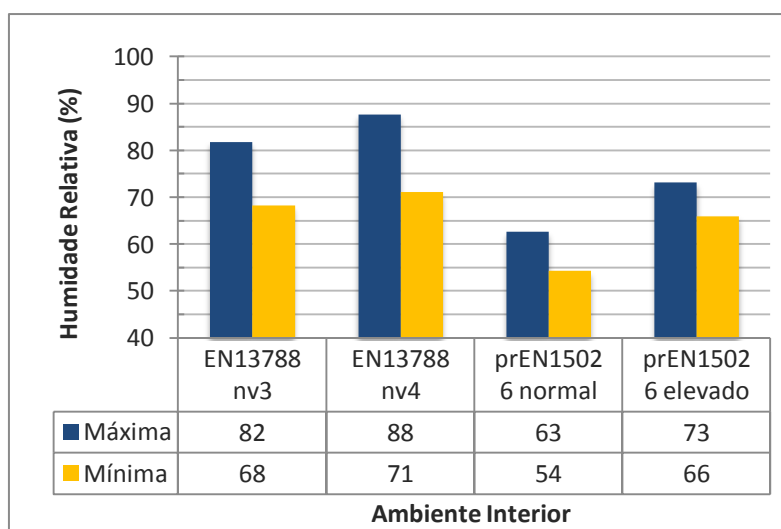
Na face interior do reboco interior a humidade relativa é traduzida pela Figura 3.23, onde se observam valores de humidade relativa opostos nos meses de Inverno entre as duas normas utilizadas. A carga de humidade que considera que há sobreocupação da habitação da norma EN13788 atinge valores que estão próximos dos valores de 85% de humidade relativa e 15°C, que representam as condições de Inverno na maioria das habitações em Portugal, dado não haver aquecimento das habitações de um modo contínuo (Freitas *et al.*, 2003).

## Análise Comparativa de Diferentes Modelos de Simulação Numérica na Avaliação da Ocorrência de Condensações Internas



**Figura 3.23 – Humidade relativa no reboco interior para os níveis normal e elevado das normas EN13788 e EN15026**

Na Figura 3.24 estão representados os valores extremos de humidade relativa para cada tipo de ambiente testado, para um período entre Outubro e Maio.

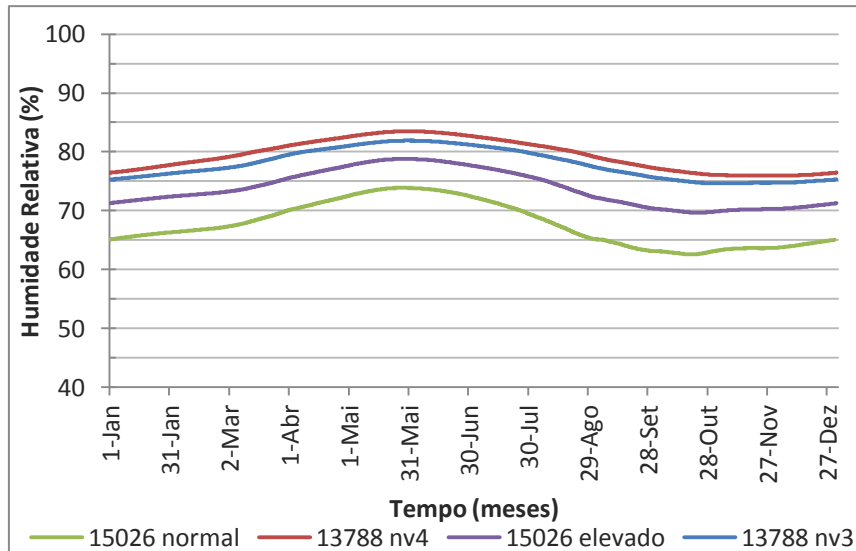


**Figura 3.24 – Valores extremos de humidade relativa, na face interior do reboco interior, para diferentes ambientes interiores**

A norma EN13788, com nível 4, apresenta-se como condicionante para as condições de humidade relativa na face interior do reboco interior, e apresenta uma maior amplitude de valores.

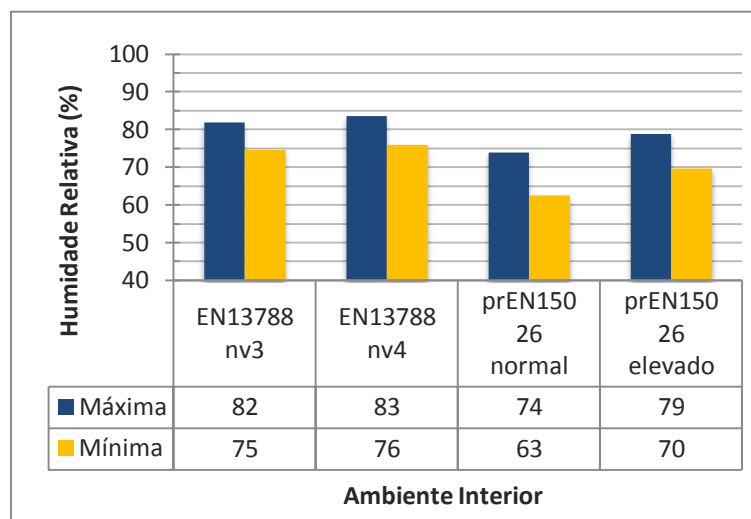
### **Centro do pano de alvenaria**

Na Figura 3.25 estão representados os valores de humidade relativa no centro do pano de alvenaria de tijolo cerâmico furado.



**Figura 3.25 – Humidade relativa no centro do pano de alvenaria de tijolo furado de 22cm para os níveis normal e elevado das normas EN13788 e EN15026**

Observa-se que os valores condicionantes no centro do pano de alvenaria cerâmica são os valores referentes à norma EN13788 para ambos os níveis de humidade absoluta interior. Também se verifica que, quanto mais elevada é a carga de humidade absoluta no ambiente interior, maior é a quantidade de humidade relativa no centro da parede, devido ao facto de haver uma menor capacidade de secagem da parede para o ambiente interior. Os valores máximos durante o período entre Outubro e Maio estão representados na Figura 3.26.



**Figura 3.26 – Valores extremos de humidade relativa no centro do pano de alvenaria para diferentes tipos de ambiente interior**

A norma EN13788 apresenta os valores mais elevados, sendo esta a norma que apresenta condições mais gravosas no centro do pano de alvenaria. A norma EN15026 apresenta maiores disparidades entre os valores correspondentes ao nível normal e elevado. Os resultados indicam que a opção mais realista é a norma EN13788 considerando um ambiente sobreocupado (nível 4).

### 3.3. Simulação de várias soluções construtivas de parede em regime variável e estacionário

Neste capítulo é abordada a simulação de 12 soluções construtivas correntes em Portugal pela metodologia de regime variável utilizada pelo WUFI e pela metodologia de regime estacionário, o método de Glaser. As soluções construtivas escolhidas para as simulações são as seguintes:

- Parede simples com alvenaria de tijolo cerâmico furado de 22cm:
  - PS1 - Sem isolamento térmico;
  - PS2 - Isolamento térmico pelo interior;
    - PS2a – com barreira pára-vapor na face interior do isolamento
  - PS3 – com caixa de ar (2cm) entre o pano de alvenaria e o isolamento térmico;
  - PS4 - Sistema ETICS;
  - PS5 - Painei Sandwich;
  - PS6 - Revestimento independente do suporte.
- Parede dupla com alvenaria de tijolo cerâmico furado (11+11cm):
  - PD1 - Sem isolamento térmico;
  - PD2 – Caixa de ar totalmente preenchida com isolamento térmico;
    - PD2a – com barreira pára-vapor na face interior do isolamento
  - PD3 – Caixa de ar (6cm) parcialmente preenchida com isolamento térmico.
    - PD3a – com barreira pára-vapor na face interior do isolamento

As simulações em regime variável foram sujeitas às condições climáticas exteriores do ficheiro climático de Lisboa e à carga de humidade absoluta interior de nível 4, com uma temperatura constante de 18°C. Esta carga de humidade interior provém da norma europeia EN13788, que foi adoptada por permitir a escolha da carga de humidade interior de acordo com um edifício sobreocupado, tal como abordado no sub-capítulo 2.4.4.3.

Na abordagem pelo método de Glaser, foram utilizadas as propriedades dos materiais semelhantes às utilizadas no modelo de regime variável e as resistências superficiais que constam na norma EN13788, representadas na Tabela 2.1.

As soluções construtivas enunciadas acima são caracterizadas nas tabelas presentes no Anexo A e os dados inseridos nas simulações higrotérmicas estão representados no Anexo D - Tabela 20.

No Anexo A - Tabela 13 estão dispostas as verificações das regras de concepção de origem francesa para evitar a ocorrência de condensações internas.

No Anexo A - Tabela 14 estão as verificações do coeficiente de transmissão térmica U, relativamente aos valores de referência do Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios. Para o clima de Lisboa (I1), apenas as soluções PS1 e PD1 não cumprem os valores de referência do RCCTE.

### 3.3.1. Risco de ocorrência de condensações internas em regime variável

O risco de ocorrência de condensações internas no conjunto de soluções construtivas de parede testadas, no modelo numérico em regime variável, é executado com uma primeira análise dos perfis de parede retirados do WUFI, onde se podem visualizar os espectros totais de temperatura, humidade relativa e teor de humidade encontrados em todas as camadas da parede. A partir da localização dos valores mais elevados de humidade relativa, realiza-se uma leitura em função da evolução da simulação num determinado ponto do perfil ao longo do tempo, da mesma forma mencionada no sub-capítulo 2.4.3. Assim, é possível determinar a época do ano em que os valores ocorrem, e se podem ser prejudiciais para o elemento construtivo. Na Figura 3.27 está representado o perfil da parede PD3, que possui um pano duplo de alvenaria de tijolo furado, e uma caixa de ar parcialmente preenchida com EPS (Anexo A - Tabela 11).

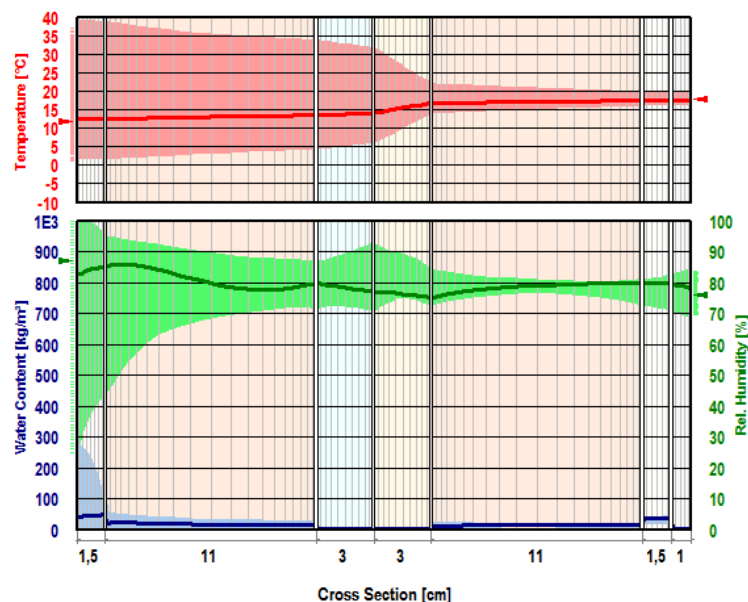
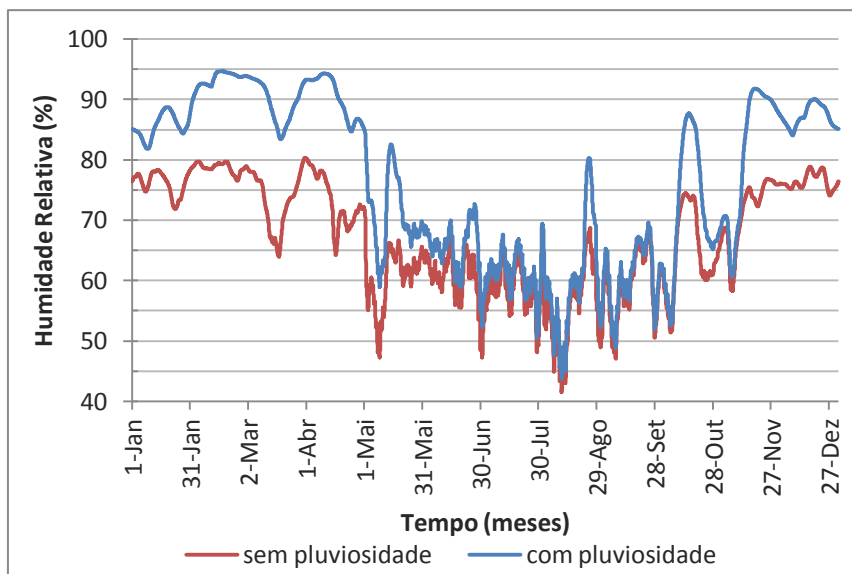


Figura 3.27 – Temperatura, humidade relativa e teor de humidade na solução PD3

Os valores máximos de humidade relativa ocorrem no reboco exterior e na face exterior do isolamento térmico. Na face interior do reboco exterior o andamento da humidade relativa durante o último ano de simulação é dado pela Figura 3.28, onde se pode analisar o último ano de simulação.

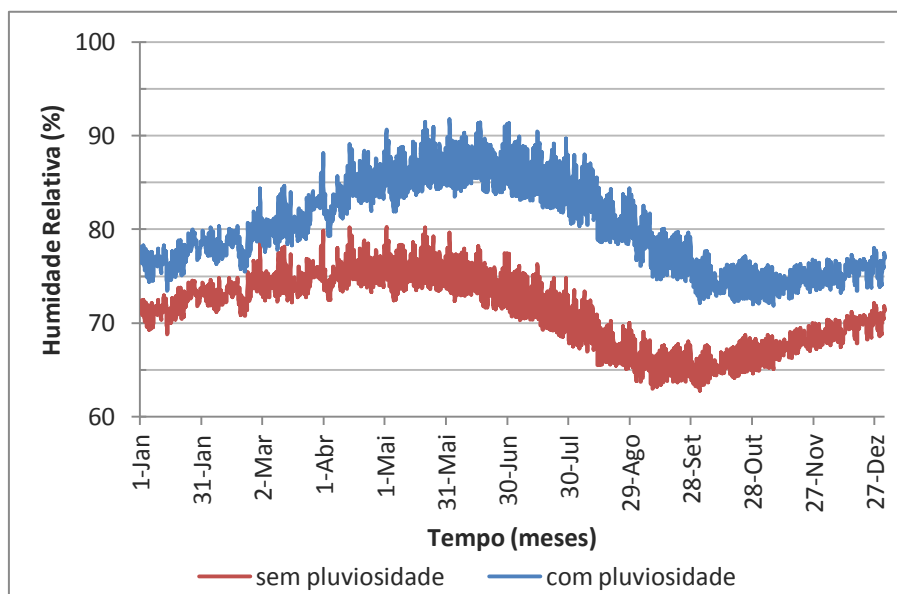
**Análise Comparativa de Diferentes Modelos de Simulação Numérica na Avaliação da Ocorrência de Condensações Internas**



**Figura 3.28 – Humidade relativa na face interior do reboco exterior na solução PD3, com presença e ausência de pluviosidade incidente**

Neste gráfico são visíveis as diferenças que ocorrem na humidade relativa nas camadas mais exteriores, causadas pela presença ou ausência de pluviosidade na fachada. É possível distinguir quando ocorrem os maiores períodos de pluviosidade, no entanto não provocam humidades relativas de 100% na face interior do reboco exterior.

Na face exterior do isolamento térmico, local onde se dão os valores máximos de humidade relativa, são atingidos valores elevados a partir do mês de Abril que ultrapassam por vezes os 90% de humidade relativa. Nos restantes meses de Inverno, os valores são bastante mais baixos, não havendo risco de condensação.



**Figura 3.29 – Humidade relativa na face exterior do isolamento térmico da solução PD3, com presença e ausência de pluviosidade incidente**

Esta avaliação foi realizada de igual forma para todos as soluções construtivas nos locais onde a humidade relativa se encontra mais elevada, e estão representados os gráficos no ANEXO F. No sub-capítulo seguinte são apresentadas tabelas onde se descrevem as observações realizadas.

### 3.3.1.1. Análise da ocorrência de condensações internas

A análise das paredes simuladas indica que a ocorrência de humidades relativas mais próximas de 100% se regista na solução PS5 (Tabela 3.6) e nas soluções onde está inserida uma barreira pára-vapor (PS2a e PD2a). De ressaltar, que as condensações que se verificam nas soluções construtivas com barreira pára-vapor se dão no período de Verão, decorrentes de um fluxo de vapor de água que migra por difusão até à face interior do isolamento térmico, que é potenciada pelo teor de humidade que a parede possa conter inicialmente no seu pano exterior, e pela humidade decorrente da precipitação que incide na fachada.

Nas paredes duplas existe um pano exterior de alvenaria de baixa espessura (11cm), apesar disso, não ocorrem condensações em que a humidade relativa atinja os 100%. Isto deve-se ao facto de o WUFI tratar o teor de humidade como água líquida, que tem como força motriz a taxa de variação de teor de humidade. Assim, ocorrem nivelamentos da água presente nos materiais devido ao seu deslocamento desde pontos mais húmidos até outros mais secos, o que impede que ocorram acumulações excessivas de humidade. O método de Glaser não considera este fenómeno, tem em conta apenas a difusão de vapor de água.

**Tabela 3.5 – Análise de ocorrência de condensações internas em diferentes paredes simples com isolamento térmico pelo interior**

Sol.	Perfil de Temperatura e Humidade Relativa	Perfil de Temperatura e Teor de Humidade
PS1		
<p>Não ocorrem condensações internas. Humidades relativas próximas de 90% no reboco interior.</p>		

## Análise Comparativa de Diferentes Modelos de Simulação Numérica na Avaliação da Ocorrência de Condensações Internas

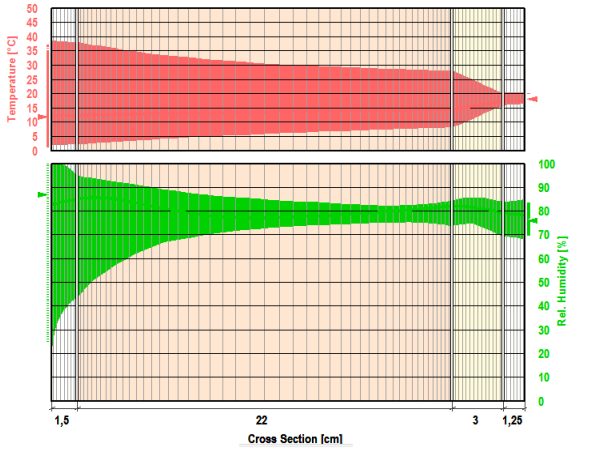
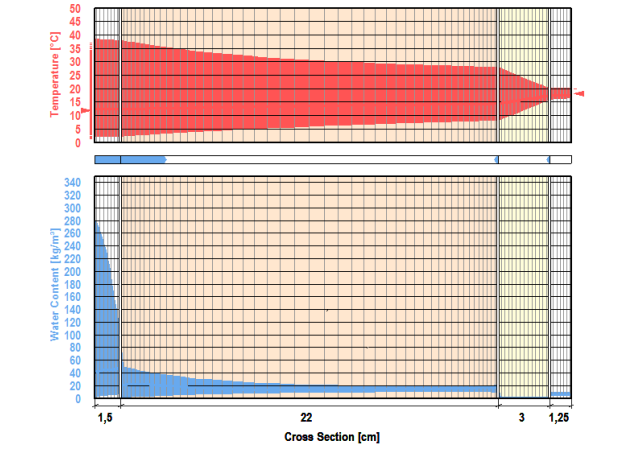
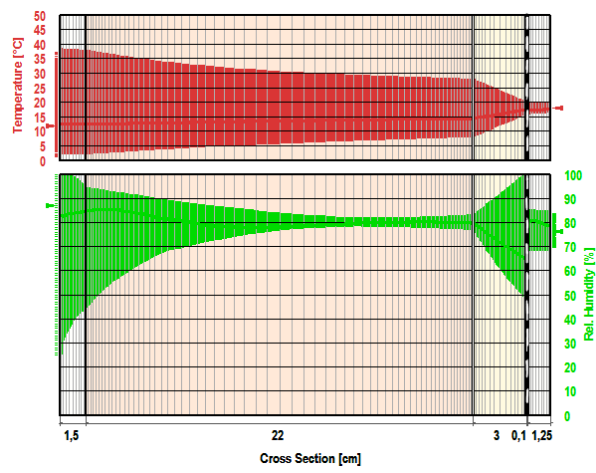
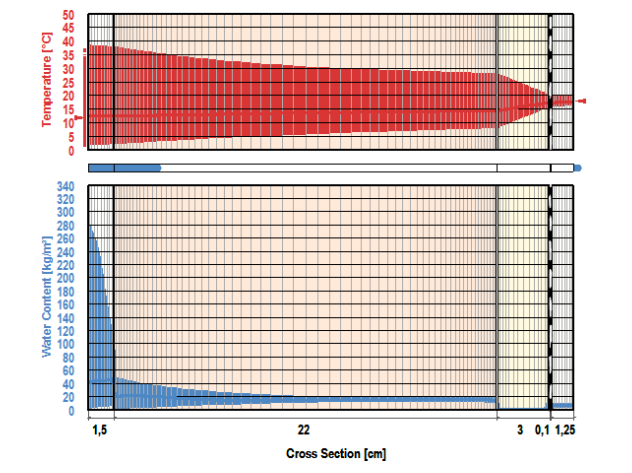
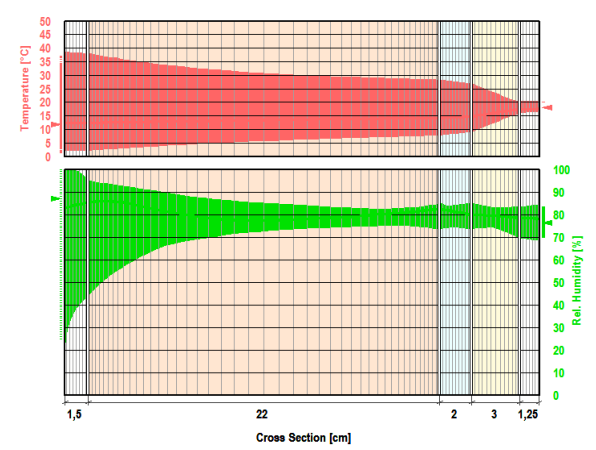
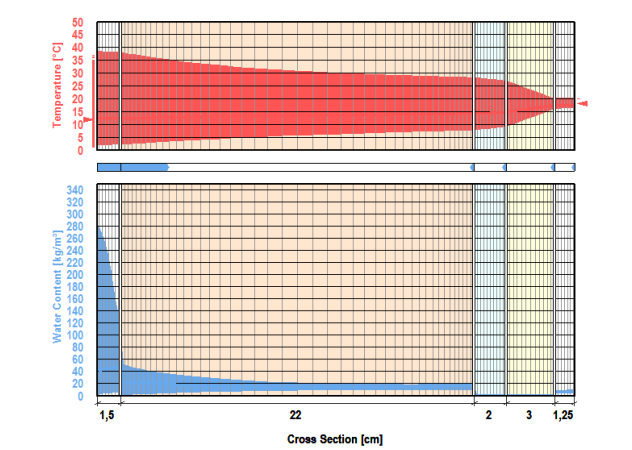
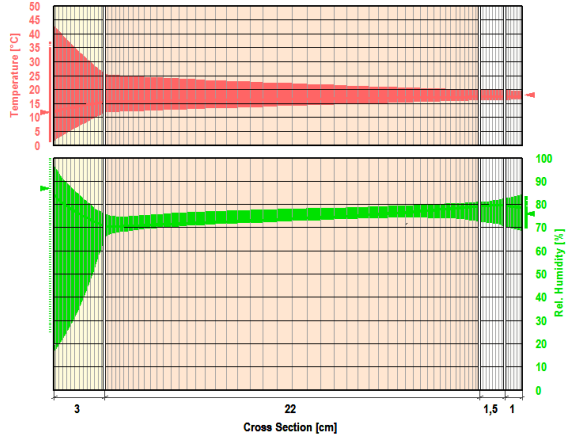
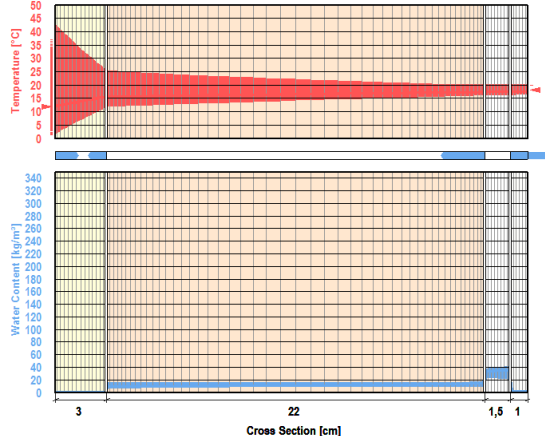
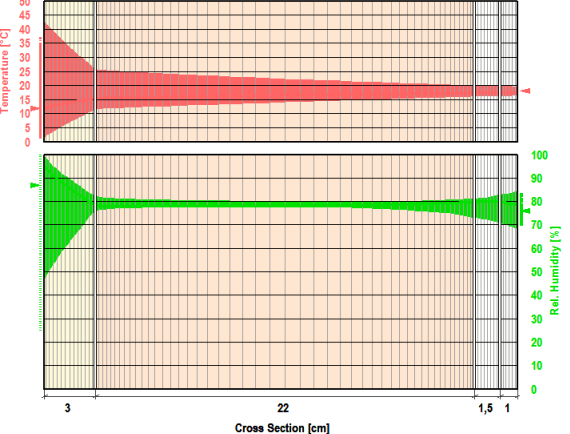
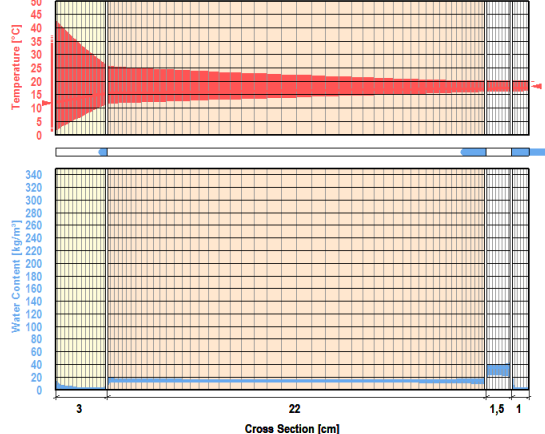
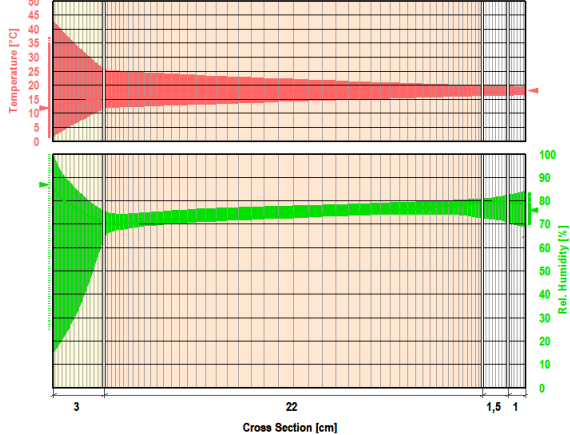
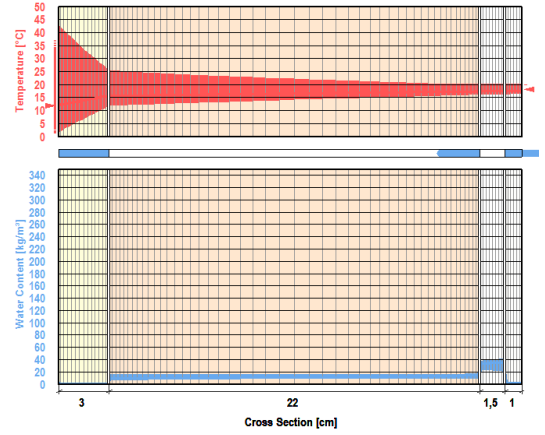
PS2		
Não ocorrem condensações internas.		
PS2a		
Ocorrem condensações internas no sentido inverso, na face interior do isolamento térmico devido à presença da barreira pára-vapor. Ocorrem nos meses de Agosto e Setembro, e a água condensada evapora até Novembro.		
PS3		
Não ocorrem condensações internas.		

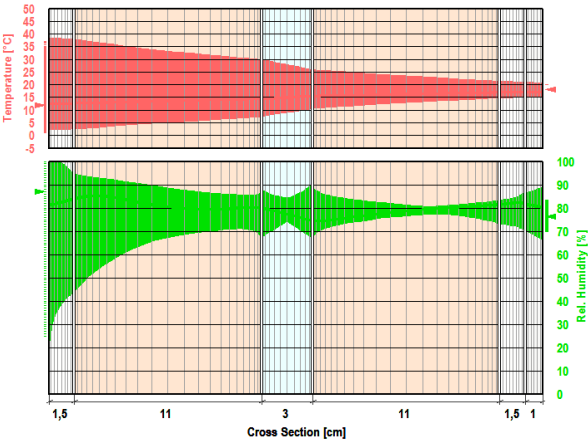
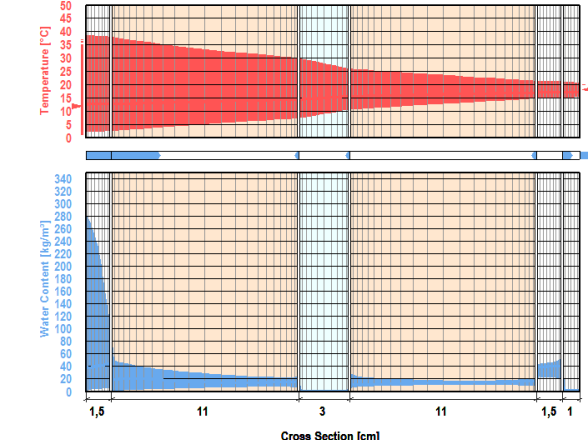
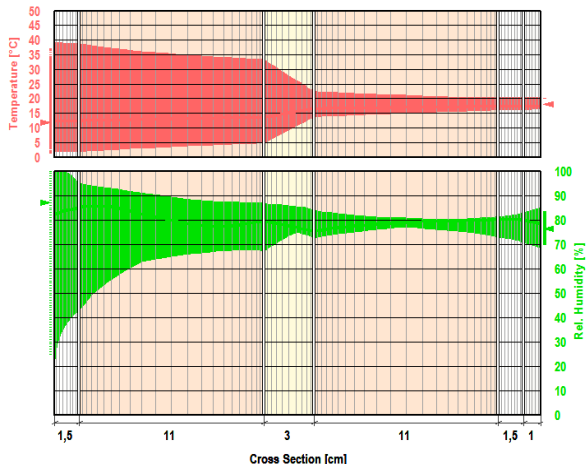
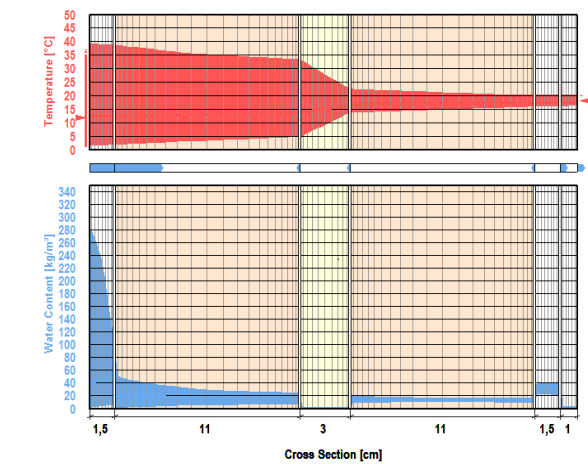
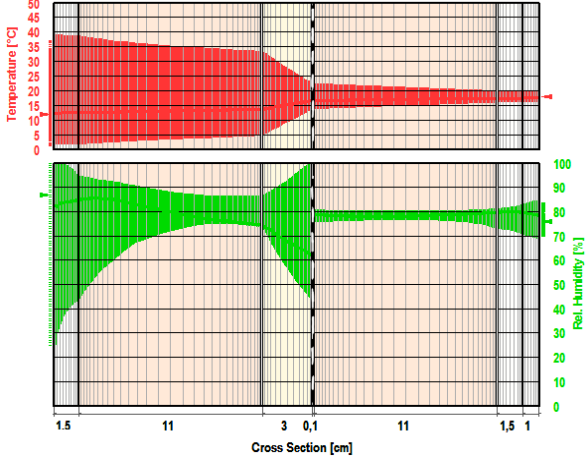
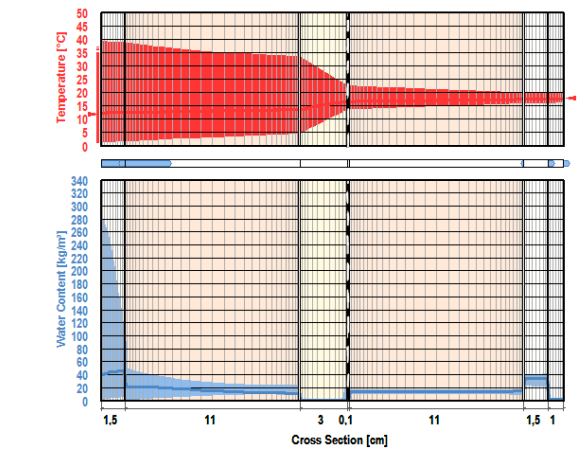


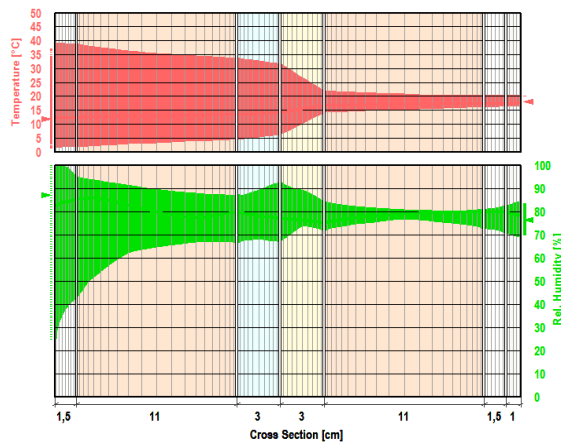
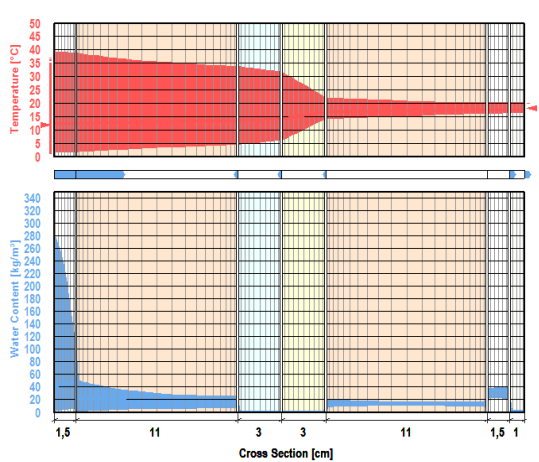
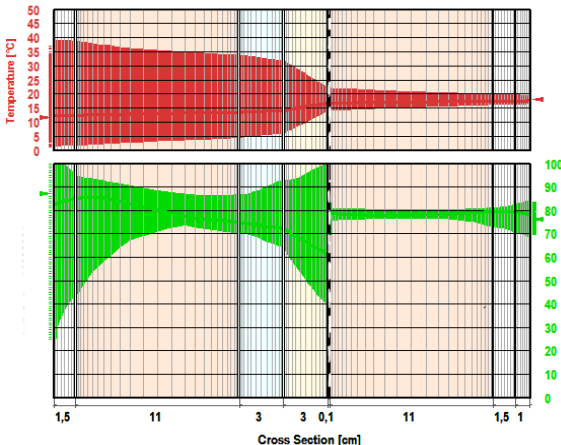
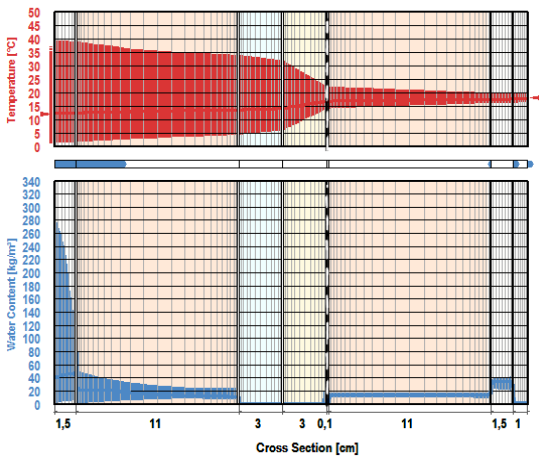
Tabela 3.6 - Análise de ocorrência de condensações internas em diferentes paredes simples com isolamento térmico pelo exterior

Sol.	Perfil de Temperatura e Humidade Relativa	Perfil de Temperatura e Teor de Humidade
PS4		
Não ocorrem condensações internas. Há humidades relativas superiores a 90% nos meses de Inverno (Anexo F – Figura 26).		
PS5		
Valores próximos dos 100% de humidade relativa, entre Janeiro e Março, que proporcionam quantidades consideráveis de humidade no isolamento térmico (Anexo F – Figura 27).		
PS6		
Semelhante à solução PS4 (Anexo F – Figura 28).		

**Análise Comparativa de Diferentes Modelos de Simulação Numérica na  
Avaliação da Ocorrência de Condensações Internas**

**Tabela 3.7 - Análise de ocorrência de condensações internas em diferentes paredes duplas**

Sol.	Perfil de Temperatura e Humidade Relativa	Perfil de Temperatura e Teor de Humidade
PD1		
<p>Não ocorrem condensações internas. Verificam-se valores elevados de humidade relativa no reboco interior e nas faces da caixa de ar.</p>		
PD2		
<p>Não ocorrem condensações internas. Os valores máximos de humidade relativa no pano interior da parede são inferiores aos da solução PD2. A temperatura é mais estável no pano interior de alvenaria (Anexo F – Figura 22).</p>		
PD2a		

	Ocorrem condensações internas no sentido inverso, entre Julho e Outubro, na face interior do isolamento térmico, semelhantes a todas as soluções com barreira pára-vapor colocada (Anexo F – Figura 23).	
PD3		
	Não ocorrem condensações internas. Há valores de humidade relativa acima de 90% na face exterior do isolamento térmico, entre Maio e Agosto (Anexo F – Figura 24).	
PD3a		
	Ocorrem condensações internas no sentido inverso, entre Maio e Agosto, na face interior do isolamento térmico, semelhantes a todas as soluções com barreira pára-vapor colocada (Anexo F – Figura 25).	

### Análise do posicionamento do isolamento térmico

O posicionamento do isolamento térmico é diferente em cada grupo de soluções construtivas simuladas. A sua colocação pelo interior, nas soluções construtivas de parede simples (PS2, PS2a e PS3), indica que o pano de alvenaria de tijolo cerâmico furado está sujeito a grandes flutuações de temperatura (Tabela 3.5). Quando são atingidas temperaturas muito baixas no exterior, toda a parede até ao isolamento térmico vai sofrer um arrefecimento. Isto conduz a humidades relativas mais elevadas, mais humidade nos poros do material e um acréscimo da condutibilidade térmica da solução construtiva, que é acompanhada de um maior risco de ocorrência de condensações.

Quando o isolamento térmico é colocado numa zona intermédia da parede, no caso das paredes duplas PD2 e PD3, existem duas zonas distintas. O pano exterior de alvenaria está sujeito às variações elevadas de temperatura semelhantes às paredes simples com isolamento térmico pelo interior, enquanto o pano interior de alvenaria sofre uma redução das variações de temperatura, o que reduz o risco de condensações internas e o aumento da humidade relativa nos dias mais frios e húmidos. Nestas soluções construtivas, o isolamento térmico está mais sujeito às piores condições que se verificam no ambiente exterior, devido à menor espessura de alvenaria que o separa do clima exterior.

A colocação do isolamento térmico pelo exterior, nas paredes simples presentes na Tabela 3.6, permite que as flutuações da humidade relativa diminuam em toda a espessura das paredes, o que se deve à diminuição da flutuação de temperatura.

### **Análise da caixa de ar**

As caixas de ar introduzidas nas soluções construtivas funcionam como uma resistência térmica acrescida no elemento construtivo, e também como corte de transporte de água no estado líquido entre o pano de alvenaria e o isolamento térmico, no caso da parede simples PS3 e na parede dupla PD3. Existe uma concentração facilitada de vapor de água em ambas as faces das lâminas de ar, o que produz valores de humidade relativa elevada nestas regiões, dependendo da direcção do fluxo de vapor. Esta flutuação do vapor de água na lâmina de ar deve-se ao facto de possuir um factor de resistência à difusão,  $\mu$ , inferior à unidade (Anexo B – Tabela 15).

### **Análise da barreira pára-vapor**

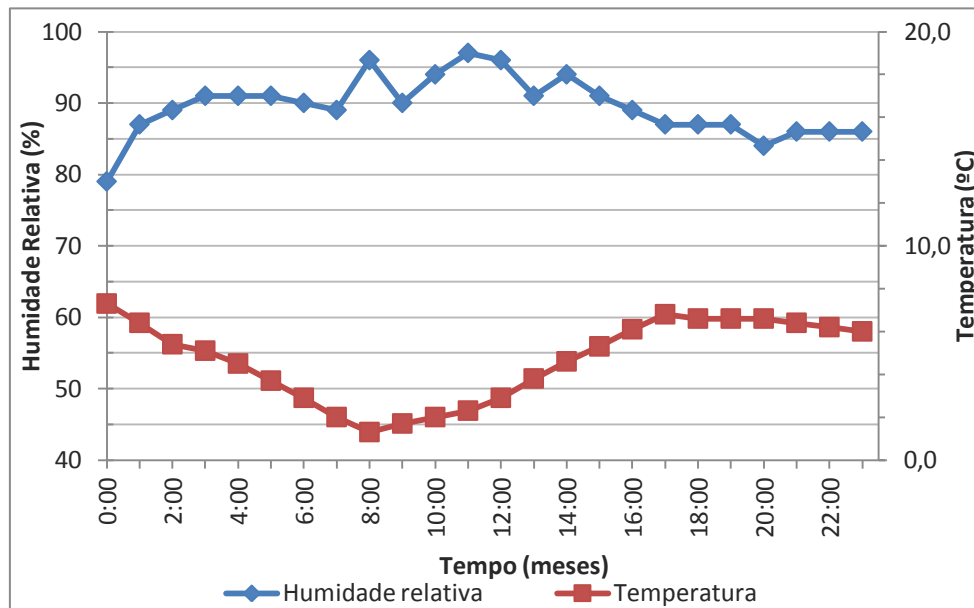
As barreiras pára-vapor impedem a migração de vapor de água a partir do ambiente interior para o isolamento térmico, permitindo deste modo que o isolamento térmico possa sofrer uma diminuição considerável de humidade relativa, quando o fluxo de vapor é dirigido para o ambiente exterior (soluções PS2a, PD2a e PD3a).

### **Análise relativa às regras de concepção**

As regras de concepção enunciadas no sub-capítulo 2.5, indicam situações mais conservativas que o estudo higrotérmico em regime variável. Deste modo, verifica-se que nas paredes simples com isolamento pelo interior e com isolamento entre dois panos de alvenaria de tijolo cerâmico, não apresentam a ocorrência de condensações por *saturação máxima* ( $H_r = 100\%$ ). Esta situação ocorre mesmo quando não são cumpridas algumas das recomendações associadas à resistência térmica do pano exterior de alvenaria, ou a não colocação de barreira pára-vapor (Anexo A - Tabela 13).

### 3.3.2. Comparativo entre regime variável e regime estacionário

O processo comparativo entre os dois métodos de avaliação de ocorrência de condensações internas abordados nesta dissertação foi baseado em dados retirados do ficheiro climático de Lisboa, no qual foi identificado um período de tempo com condições de elevada humidade e baixas temperaturas. Esse período corresponde ao dia 21 de Fevereiro do ano de referência do ficheiro climático de Lisboa. Na Figura 3.30 estão representadas as temperaturas e as humidades relativas ao longo de todo o dia 21 de Fevereiro.



**Figura 3.30 – Humidade relativa e temperatura do ambiente exterior do dia 21 de Fevereiro do ano de referência do ficheiro climático de Lisboa**

A temperatura média é de 4,7°C e a humidade relativa média é de 90%. As condições mais adversas correspondem às 8h, com uma temperatura de 1,3°C e uma humidade relativa de 96%.

Assim, foram utilizados os valores médios e mais gravosos do dia 21 de Fevereiro e os valores médios do mês de Fevereiro. O cálculo realizado com os valores referidos, pelo método de Glaser, é posteriormente comparado com os resultados das simulações realizadas no WUFI, correspondentes ao dia 21 de Fevereiro, tendo como condições iniciais toda a simulação até ao momento em que se faz a avaliação (entre 01-06-2012 a 21-02-2015).

Para facilitar a comparação entre ambas as metodologias utilizadas, foram convertidos os valores de temperatura e humidade relativa obtidos pelo WUFI, em pressões de saturação, pela equação 2-2. Posteriormente foram convertidos em pressões parciais de vapor de água, com a multiplicação das pressões de saturação pela humidade relativa em cada

ponto. Deste modo, é possível determinar as diferenças de pressão em cada ponto (equação 2-10):

$$\Delta P = P_{\text{sat}} - P_p$$

Caso o valor da diferença de pressão obtido seja negativo significa que ocorrem condensações internas. Caso a diferença de pressão seja positiva, não ocorrem condensações. Em seguida é apresentada a análise completa de dois casos, as soluções PD2 e PD2a, estando os restantes casos representados nos quadros síntese presentes no Anexo E.

### 3.3.2.1. Comparação entre as soluções PD2 e PD2a

As soluções construtivas PD2 e PD2a são constituídas por uma parede dupla de alvenaria de tijolo cerâmico furado com isolamento térmico, que preenche a totalidade da caixa de ar. São diferenciadas pela presença de uma barreira pára-vapor ( $S_d=1500\text{m}$ ) que foi colocada na face interior do isolamento térmico, no caso da solução PD2a. A sua caracterização está representada no Anexo A - Tabela 9 e Anexo A - Tabela 10.

Em primeiro lugar, foram realizadas as simulações em regime variável com as opções que constam do Anexo D - Tabela 20, cujo resultado está representado na Figura 3.31.

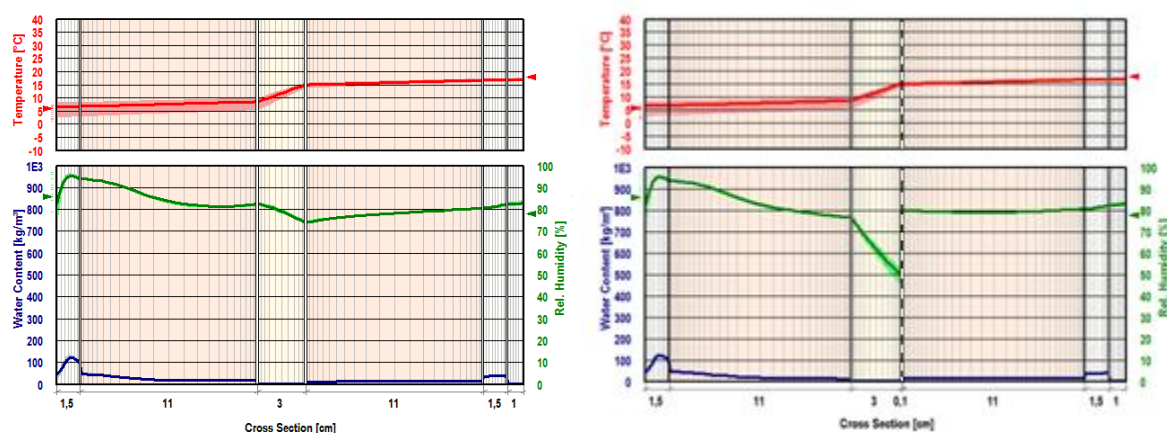
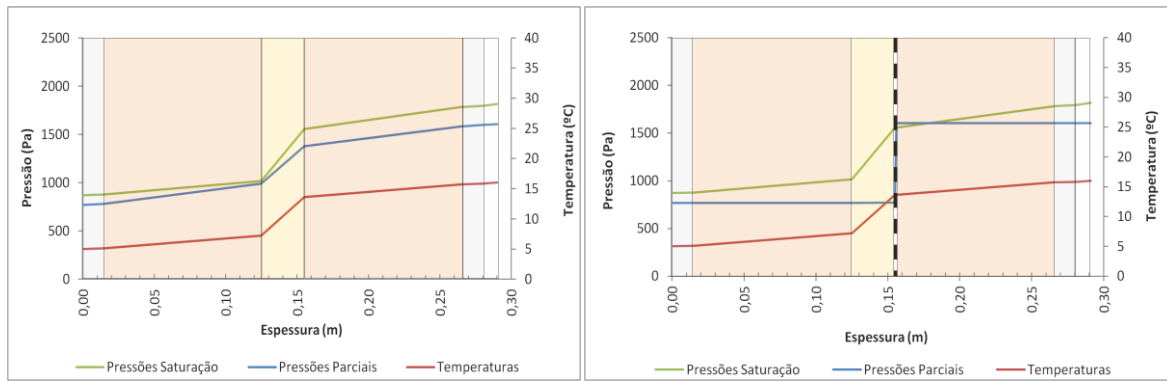


Figura 3.31 – Temperatura, humidade relativa e teor de humidade para o perfil das soluções PD2 (à esquerda) e PD2a (à direita)

A simulação em regime estacionário foi realizada com a parte das opções de regime variável que se aplicam ao método de Glaser, as temperaturas dos ambientes exterior e interior, e as resistências térmicas superficiais da Tabela 2.1. O resultado do método de Glaser está representado na Figura 3.32.



**Figura 3.32 – Temperatura, pressão parcial e pressão de saturação para os perfis da solução PD2 (à esquerda) e solução PD2a (à direita)**

Os valores resultantes do WUFI são convertidos para pressões parciais e pressões de saturação, o que permite uma comparação entre ambas as metodologias, nas diferentes interfaces de cada solução construtiva. Esta comparação é realizada em gráficos apresentados seguidamente, onde estão dispostos os valores horários de diferença de pressão do WUFI (com e sem pluviosidade incidente), e o valor constante de Glaser, em função do período do dia 21 de Fevereiro.

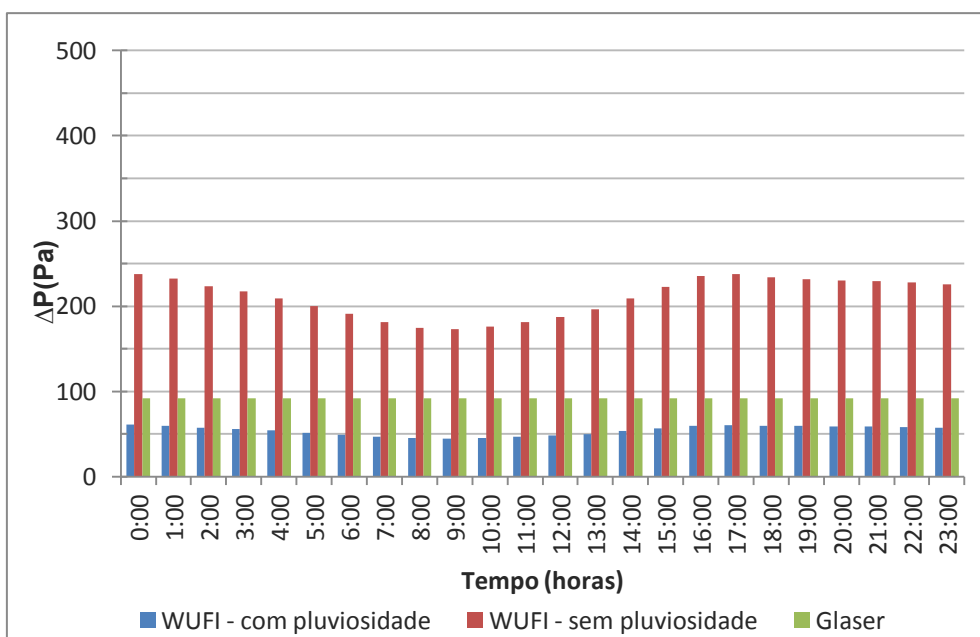
Esta avaliação está dividida pelas seguintes interfaces das soluções construtivas:

- Face interior do reboco exterior
- Face interior do pano exterior/ Face exterior do isolamento térmico
- Face interior do isolamento térmico

#### **Face interior do reboco exterior**

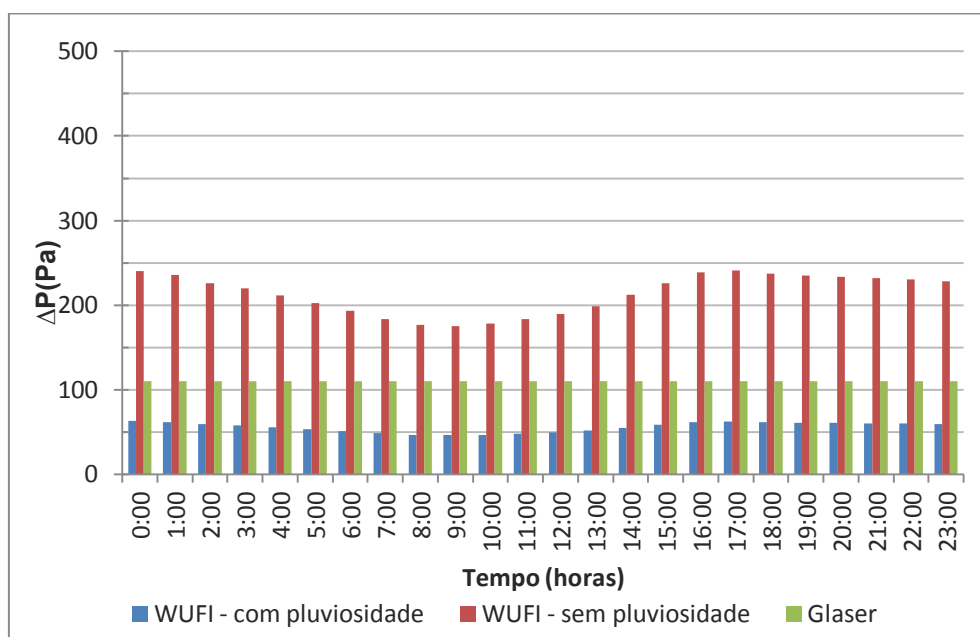
Na Figura 3.33 e Figura 3.34 estão representadas as diferenças de pressão, na interface entre a camada de argamassa exterior e o tijolo cerâmico, correspondentes à simulação no WUFI, e à simulação pelo método de Glaser.

**Análise Comparativa de Diferentes Modelos de Simulação Numérica na Avaliação da Ocorrência de Condensações Internas**



**Figura 3.33 – Diferença de pressão para o regime variável e para o regime estacionário durante o dia 21 de Fevereiro na interface entre o reboco exterior e o pano exterior de alvenaria – Valores médios diários na solução PD2**

Analisando comparativamente a simulação no WUFI com pluviosidade e sem pluviosidade, verifica-se que a incidência de pluviosidade na fachada diminui as diferenças de pressão, aumentando o risco de condensação interna nesta região, sendo o método mais realista. Incluindo o regime estacionário na análise, verifica-se que os valores que possui são mais conservativos que a simulação dinâmica sem pluviosidade, e menos conservativos que a simulação com pluviosidade.



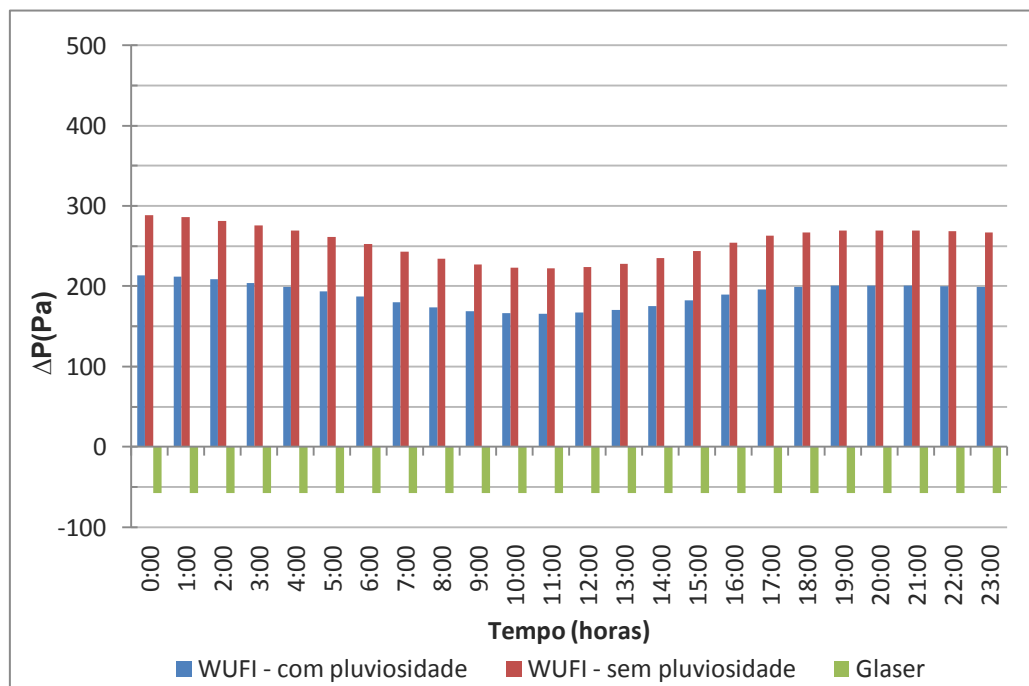
**Figura 3.34 - Diferença de pressão para o regime variável e para o regime estacionário durante o dia 21 de Fevereiro na interface entre o reboco exterior e o pano exterior de alvenaria – Valores médios diários na solução PD2a**



Estes resultados são válidos para as duas soluções construtivas, onde se verifica que a colocação da barreira pára-vapor apenas altera ligeiramente o valor resultante do método de Glaser. Conclui-se que a simulação numérica em regime variável possui valores mais gravosos, quando se trata de uma interface onde há uma grande influência da pluviosidade, quando em comparação com o método de Glaser.

### **Face interior do pano exterior de alvenaria / Face exterior do isolamento térmico**

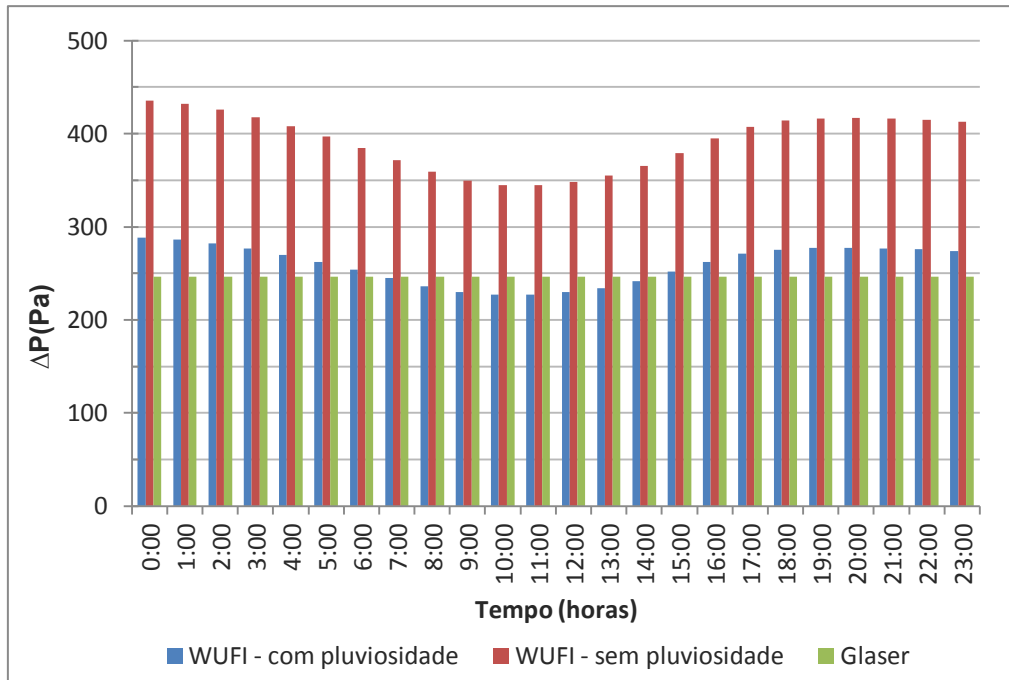
Na Figura 3.35 e Figura 3.36 estão representadas as diferenças de pressão, na interface entre o tijolo cerâmico e o isolamento térmico (EPS), correspondentes à simulação no WUFI e à simulação pelo método de Glaser.



**Figura 3.35 - Diferença de pressão para o regime variável e para o regime estacionário durante o dia 21 de Fevereiro na face interior do pano exterior de alvenaria – Valores médios diários na solução PD2**

O gráfico correspondente à solução construtiva PD2 indica que a simulação dinâmica com pluviosidade produz resultados mais gravosos que a simulação dinâmica sem pluviosidade incidente. O resultado pela metodologia de Glaser indica a ocorrência de condensações ( $\Delta P < 0$ ), e uma diferença considerável entre ambas as metodologias, num caso em que a influência da pluviosidade é menor que na interface analisada anteriormente.

## Análise Comparativa de Diferentes Modelos de Simulação Numérica na Avaliação da Ocorrência de Condensações Internas

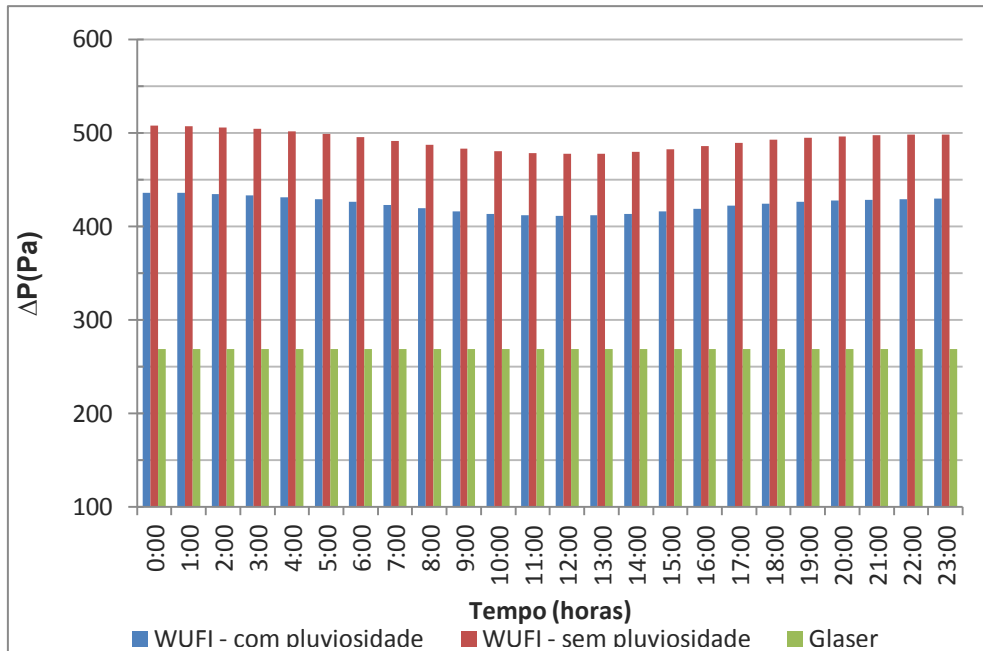


**Figura 3.36 - Diferença de pressão para o regime variável e para o regime estacionário durante o dia 21 de Fevereiro na face interior do pano exterior de alvenaria – Valores médios diários na solução PD2a**

A solução PD2a representa a colocação de uma barreira pára-vapor na face interior do isolamento térmico, que altera os resultados das simulações realizadas. Verifica-se, de uma maneira geral, que os valores das diferenças de pressão aumentam, diminuindo o risco de condensação interna. A simulação numérica em regime dinâmico produz os resultados mais gravosos no período condicionante do dia (das 6h às 15h), que nesta interface ocorre com um desfasamento de cerca de 2h relativamente à interface anterior. Nos períodos de tempo entre as 0h e as 6h, e entre as 15h e as 23h o método de Glaser tem valores mais conservativos que o WUFI. Este caso evidencia que o WUFI consegue adaptar-se melhor ao risco de ocorrência de condensação, incluindo também a inércia entre as condições climáticas do exterior e esta interface.

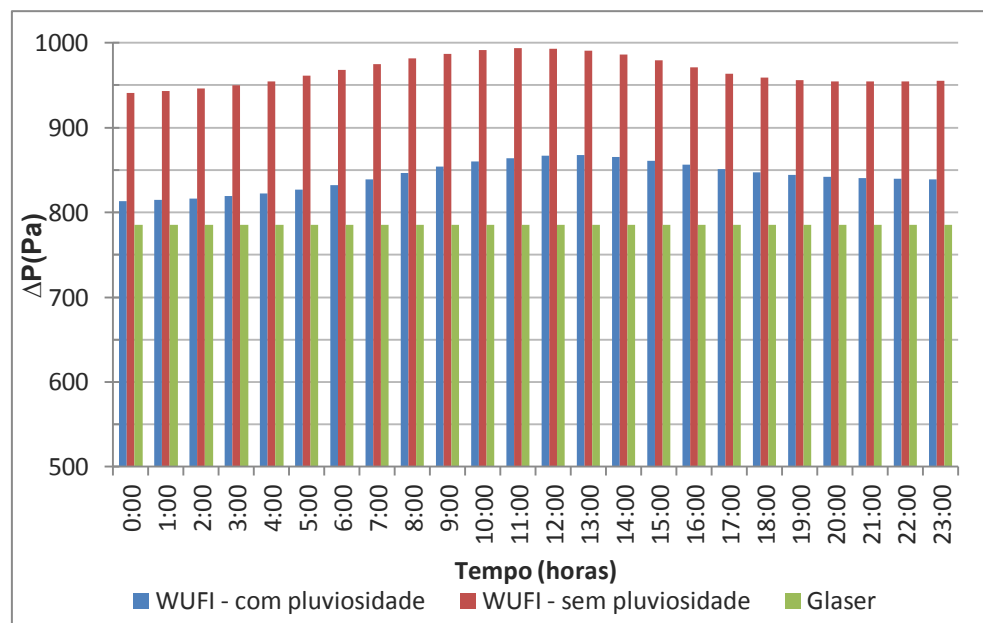
### **Face interior do isolamento térmico**

Na Figura 3.37 e Figura 3.38 estão representadas as diferenças de pressão, na face interior do isolamento térmico (EPS), correspondentes à simulação no WUFI e à simulação pelo método de Glaser.



**Figura 3.37 – Diferença de pressão para o regime variável e para o regime estacionário durante o dia 21 de Fevereiro na face interior do isolamento térmico – Valores médios diários na solução PD2**

Na solução PD2 verifica-se que o método de Glaser apresenta os valores mais condicionantes, relativamente à simulação do WUFI, não havendo risco de condensação interna em nenhum dos métodos. Existe também uma diminuição da variação das diferenças de pressões no regime dinâmico, devido à presença do isolamento térmico. O período mais gravoso do dia é atenuado devido ao aumento da pressão de saturação, associada às temperaturas mais elevadas que o isolamento térmico proporciona, na sua face interior.



**Figura 3.38 - Diferença de pressão para o regime variável e para o regime estacionário durante o dia 21 de Fevereiro na face interior do isolamento térmico – Valores médios diários na solução PD2a**

Na solução PD2a, que inclui uma barreira pára-vapor na face interior do isolamento térmico, ocorre aproximadamente o dobro da diferença de pressão, face à ausência de barreira da solução PD2. O método de Glaser mantém-se condicionante em todo o período do dia, e verifica-se um comportamento oposto relativamente à presença ou ausência de barreira pára-vapor. Quando não existe barreira, a diferença de pressão diminui durante as horas mais gravosas (Figura 3.37), e quando existe, a diferença de pressão aumenta. Este facto pode ser demonstrado a partir da equação 2-10:

$$\Delta P = P_{\text{sat}} - P_p$$

Sabendo que a humidade relativa pode ser expressa pelo quociente entre a pressão parcial e a pressão de saturação, resulta:

$$\Delta P = P_{\text{sat}} - \text{Hr} \cdot P_{\text{sat}}$$

Colocando em evidência  $P_{\text{sat}}$ :

$$\Delta P = (1 - \text{Hr}) \cdot P_{\text{sat}}$$

Neste caso ocorre aumento de  $\Delta P$  devido à diminuição da pressão parcial, provocada pela migração de vapor de água desde a face interior do isolamento em direcção ao exterior da parede. Para um valor constante de  $P_{\text{sat}}$ , a diminuição da humidade relativa provocada pela difusão de vapor de água provoca um aumento do termo  $(1 - \text{Hr})$ , o que leva a um aumento da diferença de pressão. A pressão de saturação não sofre alteração porque a barreira pára-vapor não altera as temperaturas ao longo da espessura da parede, e esta depende apenas da temperatura (equação 2-2).

Os restantes ensaios comparativos entre ambas as metodologias estão representados no sub-capítulo seguinte, onde se apresentam tabelas com as análises comparativas entre o método de Glaser e o WUFI. Estes quadros foram realizados a partir dos quadros síntese presentes no Anexo E, que partem de uma análise semelhante à apresentada neste sub-capítulo.

### **3.3.2.2. Análise dos Resultados**

A análise dos resultados deste sub-capítulo é referente às tabelas síntese que se encontram no Anexo E, que resultam da realização dos passos abordados no sub-capítulo anterior para as restantes soluções construtivas simuladas. Foram analisadas todas as soluções construtivas em função de cada interface, e do tipo de valores utilizados. O parâmetro

utilizado para determinar as diferenças entre os modelos numéricos é a diferença de pressão,  $\Delta P$ .

### **Face interior do reboco exterior**

Na interface entre o reboco exterior e o pano de alvenaria de tijolo cerâmico, é realizada uma análise para valores de temperatura e humidade relativa médios diários, médios mensais, e os valores mais gravosos do dia 21 de Fevereiro. Esta análise é realizada para todas as soluções construtivas simuladas.

### **Valores médios diários**

**Tabela 3.8 – Comparativo entre WUFI e Glaser para valores médios diários – Face interior do reboco exterior**

<b>Glaser – WUFI c/ pluviosidade</b>	<p>A simulação pelo WUFI apresenta valores mais conservativos que o método de Glaser, em todas as soluções construtivas de parede simples com isolamento térmico pelo interior e nas paredes duplas (Anexo E - Tabela 21).</p> <p>Em regiões muito influenciadas pela pluviosidade incidente, a simulação numérica em regime variável assume valores com maior risco de ocorrência de condensação.</p>
<b>Glaser – WUFI s/ pluviosidade</b>	<p>O método de Glaser é mais conservativo que a simulação numérica em regime variável, quando se realiza a comparação entre este método e a simulação numérica sem pluviosidade incidente (Anexo E - Tabela 24).</p>

### **Valores médios mensais**

**Tabela 3.9 – Comparativo entre WUFI e Glaser para valores médios mensais – Face interior do reboco exterior**

<b>Glaser – WUFI c/ pluviosidade</b>	<p>A simulação pelo WUFI apresenta valores mais conservativos que o método de Glaser, em todas as soluções construtivas de parede simples com isolamento térmico pelo interior e nas paredes duplas (Anexo E - Tabela 22).</p> <p>Verifica-se que os valores médios mensais de Glaser dão origem a valores de diferença de pressão superiores, dado que a média mensal</p>
--	--

**Análise Comparativa de Diferentes Modelos de Simulação Numérica na  
Avaliação da Ocorrência de Condensações Internas**

	atenua os valores mais gravosos, diminuindo o risco de ocorrência de condensação.
<b>Glaser – WUFI s/ pluviosidade</b>	<p>A simulação do WUFI apresenta-se condicionante no período mais gravoso para esta interface (entre as 6h e as 12h).</p> <p>O método de Glaser apresenta valores mais gravosos no restante período do dia. Esta alternância de valores indica que o regime variável faz uma melhor distinção entre os momentos com maior e menor risco de condensação (Anexo E - Tabela 25).</p>

**Valores condicionantes**

**Tabela 3.10 – Comparativo entre WUFI e Glaser para valores condicionantes – Face interior do reboco exterior**

<b>Glaser – WUFI c/ pluviosidade</b>	<p>Os valores de <math>\Delta P</math> mais gravosos pertencem ao método de Glaser, nas soluções construtivas que não possuem barreira pára-vapor (PS2, PS3, PD2, PD3).</p> <p>Nas restantes paredes, no período de tempo mais gravoso (entre as 6h e as 13h), o WUFI é condicionante. No resto do dia os valores do método de Glaser são os que indicam maior risco de condensação (Anexo E - Tabela 23).</p> <p>Quando a solução construtiva possui uma barreira pára-vapor, a metodologia de Glaser considera que a pressão parcial diminui na face interior do reboco exterior, aumentando o valor de <math>\Delta P</math>. Na realidade, o WUFI indica que nesta interface a influência da pluviosidade se sobrepõe à difusão de vapor, possuindo sempre valores muito aproximados em todas as paredes.</p>
<b>Glaser – WUFI s/ pluviosidade</b>	Para a simulação numérica sem pluviosidade, observa-se que o método de Glaser apresenta um maior risco de condensações na face interior do reboco exterior durante todo o dia 21 de Fevereiro. Isto ocorre do mesmo modo em todas as soluções construtivas (Anexo E - Tabela 26).

**Face interior do pano exterior da parede/ Face exterior do isolamento térmico**

Na interface entre a face interior do pano de alvenaria e o isolamento térmico, é realizada uma análise para valores de temperatura e humidade relativa médios diários, médios mensais, e os valores mais gravosos do dia 21 de Fevereiro. Todas as soluções construtivas são analisadas para esta interface.

**Valores médios diários**

**Tabela 3.11 – Comparativo entre WUFI e Glaser para valores médios diários - Face interior do pano exterior da parede/ Face exterior do I.T.**

<p><b>Glaser – WUFI c/ pluviosidade</b></p>	<p>A simulação variável com pluviosidade indica valores condicionantes nas soluções construtivas que possuem barreira pára-vapor (PS2a, PD2a e PD3a). Neste tipo de parede, os valores de <math>\Delta P</math> de Glaser aumentam, porque há uma diminuição da pressão parcial, e uma manutenção da pressão de saturação.</p> <p>Devido a este facto, o WUFI ocorre como condicionante na interface entre a alvenaria e o EPS, nas soluções PS2a e PD2a. O mesmo ocorre na face interior da alvenaria e na face exterior do EPS, na solução PD3a (Anexo E - Tabela 21).</p> <p>Considera-se a existência de risco de condensação nas soluções nas soluções PS2, PS3 e PD2. Na solução PD3 existe risco apenas na face interior do pano exterior. Este risco é indicado pela metodologia de Glaser.</p>
<p><b>Glaser – WUFI s/ pluviosidade</b></p>	<p>Comparativamente com o modelo numérico em regime variável sem pluviosidade, o método de Glaser é condicionante para todas as soluções construtivas, nas regiões que compreendem a face interior do pano exterior e a face exterior do isolamento térmico, e nos casos em que não exista caixa de ar, na interface entre o isolamento e a alvenaria de tijolo cerâmico furado.</p> <p>Há risco de condensações na face interior do pano exterior das soluções PS2, PS3, PD2 e PD3 e na face exterior do isolamento térmico das soluções PS3 e PS5 (Anexo E - Tabela 24). Este risco é dado apenas pela metodologia de Glaser.</p>

### Valores médios mensais

Tabela 3.12 – Comparativo entre WUFI e Glaser para valores médios mensais - Face interior do pano exterior da parede/ Face exterior do I.T.

<b>Glaser – WUFI c/ pluviosidade</b>	As soluções construtivas PS2, PS3, PD2 e PD3 possuem o método de Glaser como condicionante. As soluções construtivas PS2a, PD2a e PD3a possuem a simulação variável com valores condicionantes de $\Delta P$ (Anexo E - Tabela 22).
<b>Glaser – WUFI s/ pluviosidade</b>	No caso da simulação variável sem pluviosidade, o método de Glaser é condicionante em todas as soluções, excepto na parede PS2a, onde a simulação no WUFI é condicionante no período de tempo mais gravoso (entre as 10h e as 17h). No resto do dia o método de Glaser é mais gravoso (Anexo E - Tabela 25).

### Valores condicionantes

Tabela 3.13 – Comparativo entre WUFI e Glaser para valores condicionantes - Face interior do pano exterior da parede/ Face exterior do I.T.

<b>Glaser – WUFI c/ pluviosidade</b>	<p>A simulação variável indica valores condicionantes na solução PS2a, onde existe uma barreira pára-vapor, o que aumenta muito a pressão parcial na metodologia de Glaser.</p> <p>Nas restantes soluções construtivas, existe risco de ocorrência de condensação segundo Glaser, nas soluções PS2, PS3, PD2 e PD3. (Anexo E - Tabela 23).</p>
<b>Glaser – WUFI s/ pluviosidade</b>	<p>A metodologia de Glaser corresponde à pior combinação de temperatura e humidade relativa do exterior e possui os valores mais conservativos nesta região, assumindo a ocorrência de condensações nas soluções PS2, PS3, PD2 e na face interior do pano exterior de PD3 (Anexo E - Tabela 26).</p> <p>Existe risco de ocorrência de condensações no isolamento térmico da solução PS5, segundo Glaser, e valores muito baixos no WUFI. Na solução PS6, a simulação em regime variável é condicionante no período de tempo mais gravoso (entre as 3h e as 12h).</p>



### **Face interior do isolamento térmico**

Na face interior do isolamento térmico é realizada uma análise para valores de temperatura e humidade relativa médios diários, médios mensais, e os valores mais gravosos do dia 21 de Fevereiro. Todas as soluções construtivas são analisadas para esta interface.

#### **Valores médios diários**

**Tabela 3.14 – Comparativo entre WUFI e Glaser para valores médios diários – Face interior do I.T.**

<b>Glaser – WUFI c/ pluviosidade</b>	<p>Com a pluviosidade activa no regime variável, o método de Glaser é condicionante na face interior do isolamento térmico de todas as soluções, com excepção para a solução PS2a, onde o WUFI com pluviosidade incidente representa o valor mais gravoso de diferença de pressão (Anexo E - Tabela 21).</p> <p>Entre as soluções PS2a e PD2a, as pressões parciais são iguais entre a superfície exterior e a face interior do isolamento térmico. Deste modo, apenas a pressão de saturação faz a diferença.</p> <p>No caso da solução PS2a, maiores pressões de saturação fazem com que o valor de <math>\Delta P</math> de Glaser se superiorize ao valor do WUFI, que apresenta valores próximos em ambas as soluções.</p>
<b>Glaser – WUFI s/ pluviosidade</b>	<p>Para os valores médios diários, o método de Glaser é mais conservativo em todas as soluções de parede, para a simulação em regime variável sem pluviosidade incidente. Este método indica risco de ocorrência de condensações na solução PS5 (Anexo E - Tabela 24).</p>

#### **Valores médios mensais**

**Tabela 3.15 – Comparativo entre WUFI e Glaser para valores médios mensais – Face interior do I.T.**

<b>Glaser – WUFI c/ pluviosidade</b>	<p>Quando se activa a pluviosidade incidente, os valores de Glaser são sempre condicionantes em todas as soluções construtivas (Anexo E - Tabela 22).</p>
--	---

<b>Glaser – WUFI s/ pluviosidade</b>	Na simulação numérica em regime variável realizada no WUFI, em que não foi utilizada a pluviosidade incidente na fachada, indica valores de diferença de pressão superiores ao método de Glaser, que é o mais condicionante em todas as paredes, excepto a solução PS4, onde o WUFI é condicionante (Anexo E - Tabela 25).
--	--

### Valores condicionantes

**Tabela 3.16 – Comparativo entre WUFI e Glaser para valores condicionantes – Face interior do I.T.**

<b>Glaser – WUFI c/ pluviosidade</b>	<p>Ao activar a pluviosidade na simulação em regime variável, verifica-se que a solução PS2a possui como valores condicionantes a simulação do WUFI durante todo o período do dia.</p> <p>As soluções PD2a e PD3a possuem um período em que os valores condicionantes são os do WUFI (entre as 0 e 3h), no entanto nas horas mais gravosas, verifica-se que o método de Glaser é o que apresenta os valores mais baixos.</p> <p>Este método é também condicionante na face interior do isolamento térmico das restantes soluções construtivas, durante todo o dia.</p>
<b>Glaser – WUFI s/ pluviosidade</b>	<p>Quando se utilizam valores condicionantes no método de Glaser, verifica-se que os valores produzidos são mais gravosos na face interior do isolamento térmico para todas as soluções, excepto a solução PS2a.</p> <p>Nesta solução o WUFI apresenta o valor mais baixo de <math>\Delta P</math>, no período de tempo mais condicionante (entre as 0 e as 13h).</p> <p>Na solução PS5 é indicado o risco de ocorrência de condensações internas pelo método de Glaser (Anexo E - Tabela 23).</p>

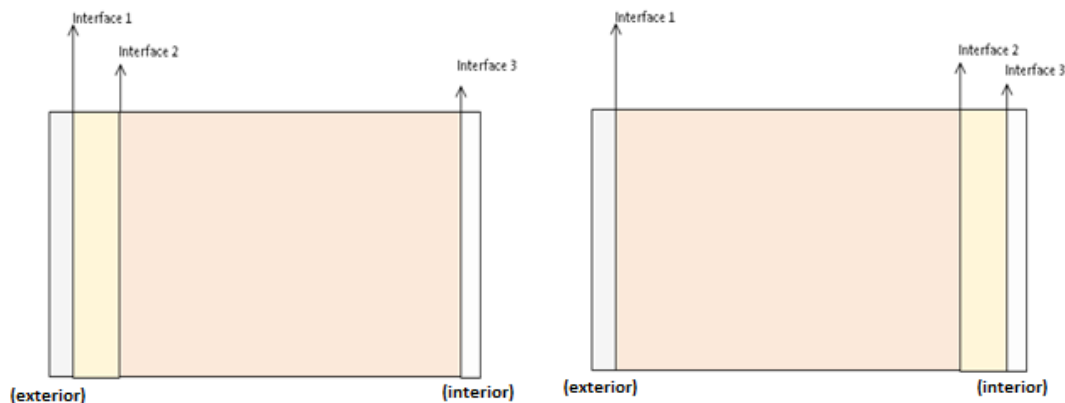
De uma maneira geral, este estudo comparativo indica que a utilização de valores médios progressivamente mais abrangentes no tempo, atenua os períodos em que se registam as condições mais desfavoráveis no ambiente exterior. O WUFI utiliza uma maior quantidade de variáveis que o método de Glaser, e evidenciam-se a influência da pluviosidade incidente e da inércia hídrica, o que resulta em valores menos gravosos para o regime dinâmico, à medida que se avança pela espessura da parede. A colocação de barreiras pára-vapor tem mais expressão na metodologia de Glaser, dado que o impedimento da difusão de vapor

cancela a ocorrência do principal fenómeno considerado por este método. Por esta razão, encontram-se regiões onde o WUFI é condicionante, após a colocação destes elementos, em zonas mais interiores das paredes.

### 3.3.3. Temperaturas de interface com alteração da posição da camada de isolamento térmico segundo o método de Glaser

O diferente posicionamento das camadas constituintes de uma solução construtiva de parede produz alterações na temperatura ao longo da sua espessura. Neste sub-capítulo foi realizado um estudo de sensibilidade nas interfaces de uma solução construtiva constituída por um pano de alvenaria de tijolo cerâmico de 22cm, uma camada de poliestireno expandido com 3cm de espessura, e uma placa de gesso cartonado com 1,25cm.

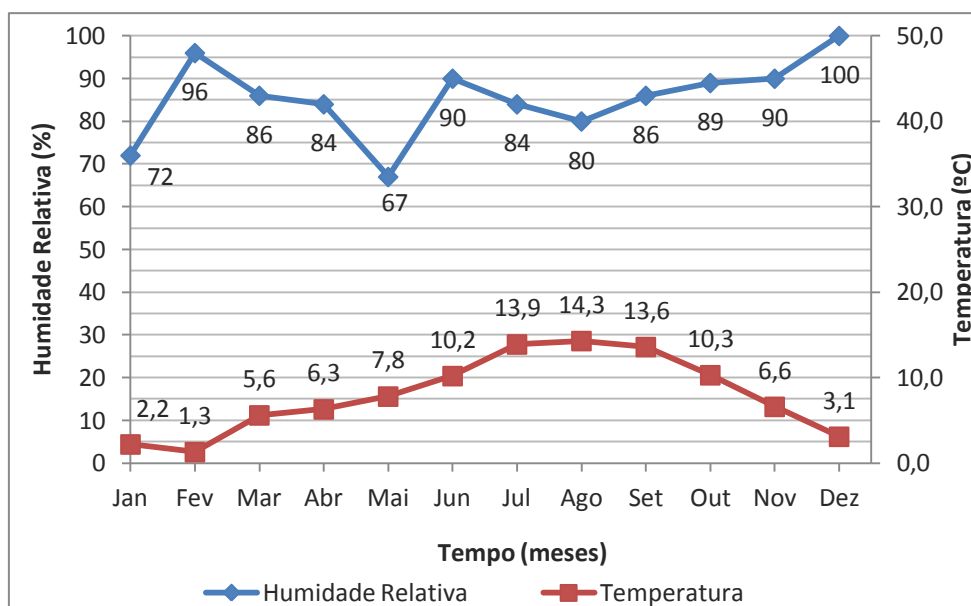
Foram determinadas, segundo o método de Glaser, as temperaturas na interface da solução construtiva com isolamento térmico colocado pelo interior, e com a alteração do posicionamento do isolamento térmico para a face interior do reboco exterior (Figura 3.39), no sentido de avaliar as diferenças de temperatura ao longo do tempo para ambos os casos, considerando os valores exteriores mais gravosos e também os valores médios de temperaturas e humidades relativas interior e exterior de cada mês (Figura 3.40 e Figura 3.41).



**Figura 3.39 – Posicionamento do isolamento térmico na solução construtiva para a análise dos interfaces, com isolamento pelo exterior (à esquerda) e isolamento pelo interior (à direita)**

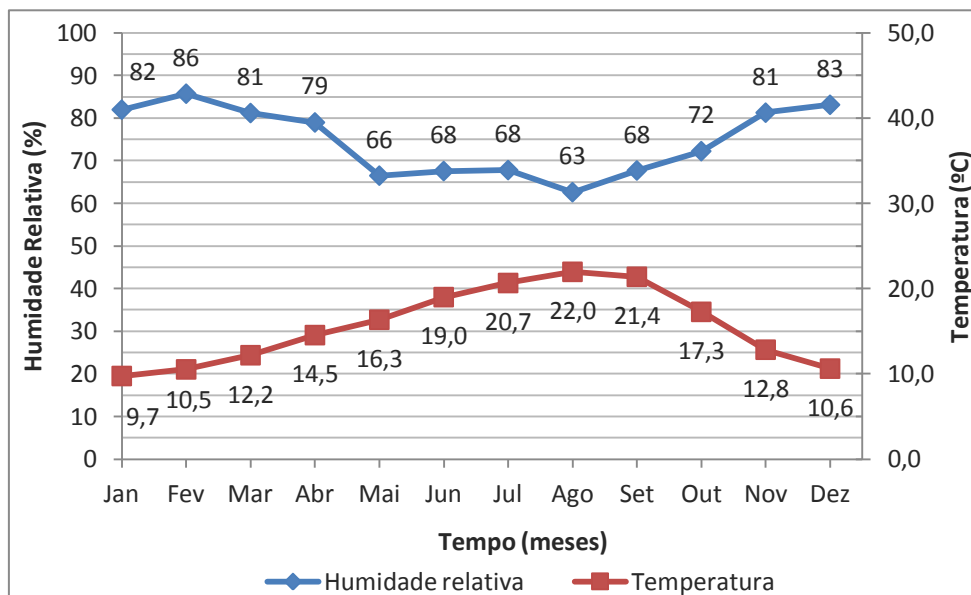
Os meses com os dados horários mais gravosos são Fevereiro e Dezembro, ambos combinam temperaturas muito baixas com humidades relativas muito elevadas, o que produz pressões de saturação mais baixas no ambiente exterior.

**Análise Comparativa de Diferentes Modelos de Simulação Numérica na Avaliação da Ocorrência de Condensações Internas**



**Figura 3.40 – Humidade relativa e temperatura correspondentes às piores condições exteriores de cada mês**

Quando se determina a média mensal da temperatura e humidade relativa de cada mês, as disparidades encontradas nos valores instantâneos mais condicionantes atenuam-se. O cálculo destes valores médios é o preconizado pela norma europeia EN13788 para a determinação do risco de ocorrência de condensações internas pela metodologia de Glaser.



**Figura 3.41 – Humidade relativa e temperatura correspondente às médias mensais exteriores de cada mês**

A diferença entre os valores médios e extremos de cada mês resulta frequentemente em diferenças no risco de condensação de ambas as metodologias, em que, para o mesmo período, o WUFI apresenta um maior risco de condensação que não se verifica no método de Glaser, dado que trabalha com valores médios horários.

Os valores correspondentes ao ambiente interior foram retirados da norma EN13788 para uma carga de humidade interior de nível 4, com uma temperatura constante de 18°C. Na Figura 3.42 estão representados os valores mais gravosos de cada mês. Posteriormente foram calculados os valores médios mensais, que estão representados na Figura 3.43.

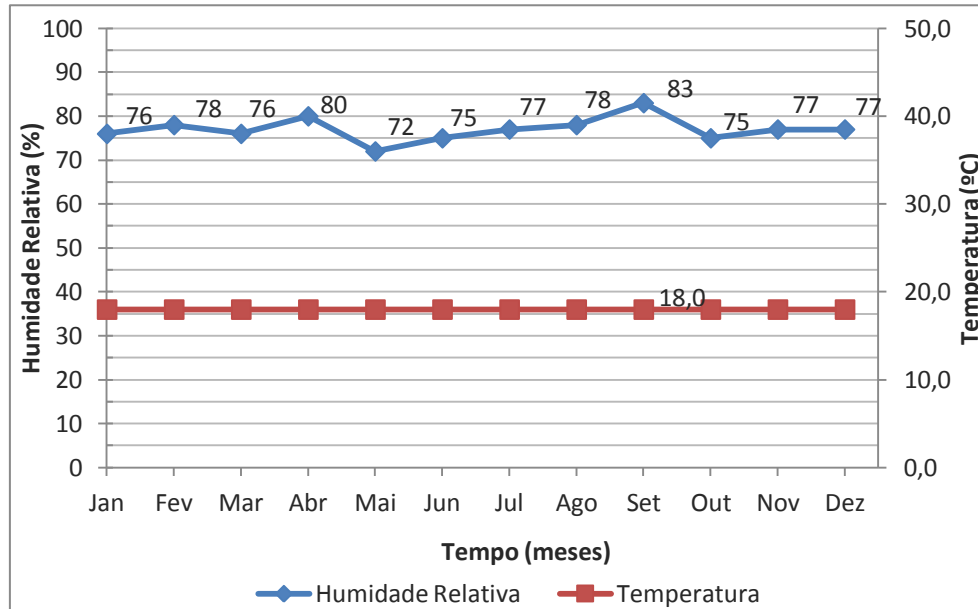


Figura 3.42 – Humidade relativa e temperatura correspondentes às piores condições interiores de cada mês

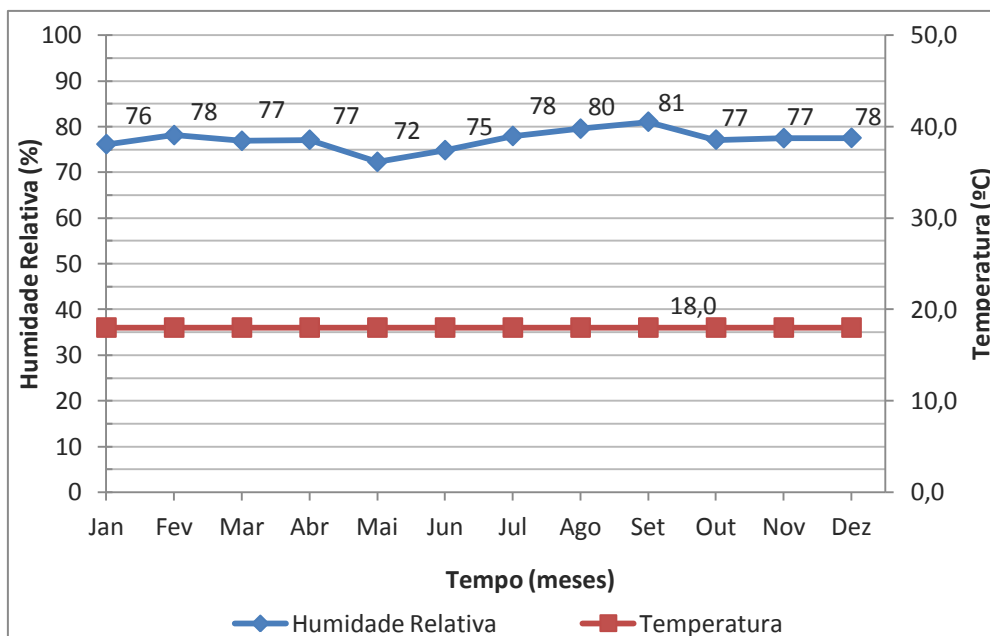
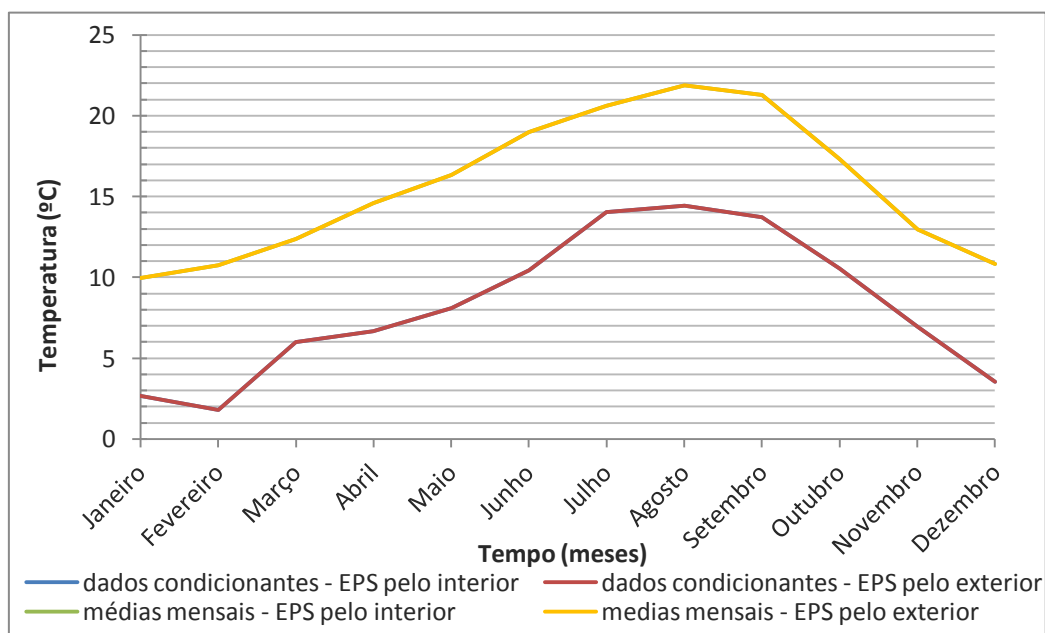


Figura 3.43 - Humidade relativa e temperatura correspondente às médias mensais interiores de cada mês

### 3.3.3.1. Análise dos Resultados

Os resultados que se apresentam seguidamente correspondem às temperaturas das três interfaces de ambos os elementos construtivos para os valores médios mensais, e para os valores instantâneos mais condicionantes. Na Figura 3.44 estão representadas as temperaturas na Interface 1, que compreende a fronteira entre o reboco exterior e o pano de alvenaria, para a solução com isolamento térmico colocado pelo interior, e a fronteira entre o reboco exterior e a alvenaria de tijolo cerâmico, para a solução que possui isolamento térmico colocado pelo interior. As linhas representativas das temperaturas médias mensais encontram-se sobrepostas, tal como as que representam os dados condicionantes.

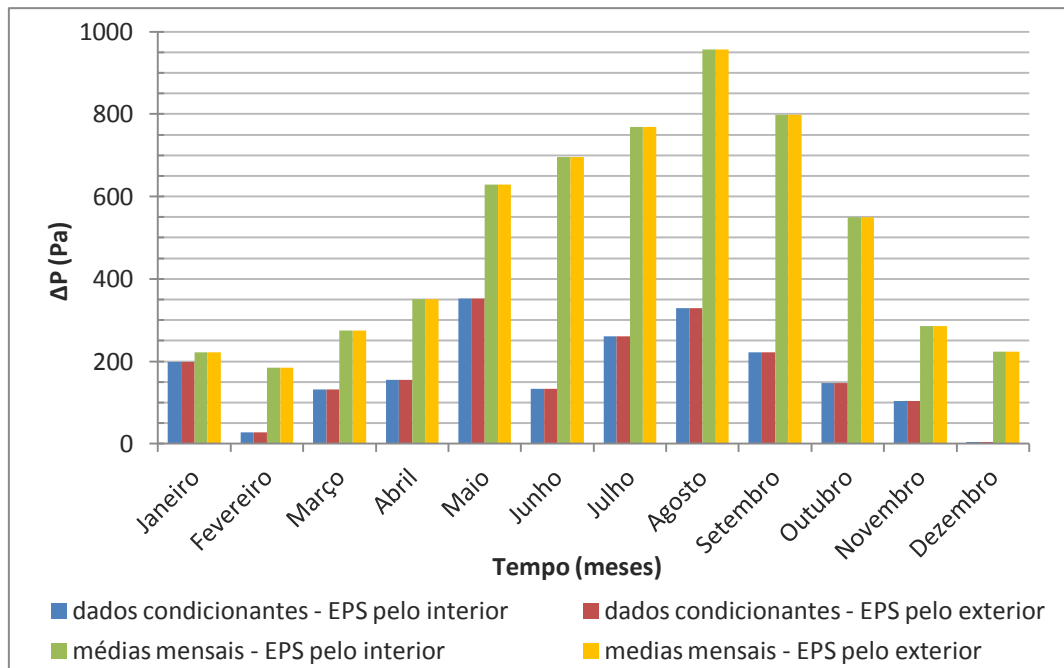


**Figura 3.44 – Interface 1 – Variação da temperatura ao longo do ano para os valores mais condicionantes e valores médios do ambiente exterior, para uma solução**

Na interface 1 do elemento construtivo os valores de temperatura correspondentes aos dados mais condicionantes e médias mensais de temperatura do ambiente exterior, correspondem ao mesmo valor durante todo o ano, quer se coloque o isolamento térmico pelo interior do pano de alvenaria ou pelo exterior. Como a única camada que separa esta interface do exterior é o reboco, a temperatura nesta interface apenas depende da resistência térmica do reboco, do coeficiente de transmissão térmica da parede,  $U$ , que se mantém com as trocas de posicionamento dos materiais, e a diferença de temperatura entre os ambientes exterior e interior.

$$T_1 = T_{se} + R_{(\text{reboco})} \cdot U \cdot (t_e - t_i)$$

Deste modo, as diferenças de pressão na interface são iguais para os dados condicionantes e médias mensais, independentemente da posição do isolamento térmico (Figura 3.45).



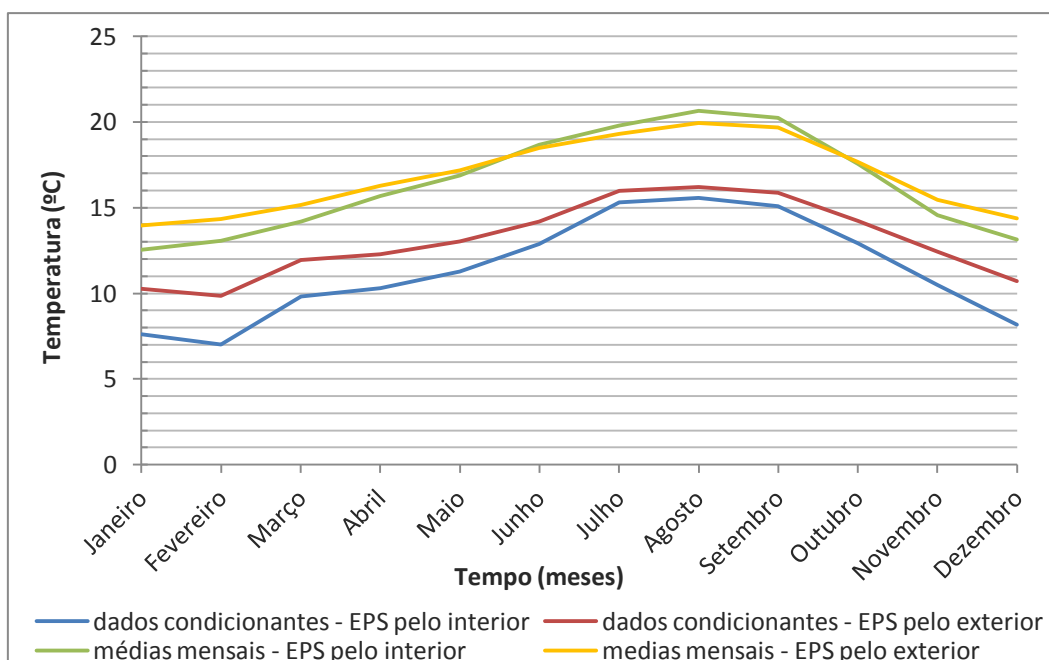
**Figura 3.45 – Interface 1 – Diferenças de pressão correspondentes aos dados médios e mais condicionantes mensais, considerando o isolamento térmico colocado pelo exterior ou pelo interior**

A diferença de pressão é dada pela diferença entre a pressão de saturação e a pressão parcial. Dado que as temperaturas se equivalem para os valores médios mensais e os dados condicionantes, as pressões de saturação são também as mesmas para ambos os tipos de valores. Por outro lado, a pressão parcial é também equivalente para esta interface, pois a resistência à difusão da parede entre a face interior do reboco exterior e a face interior da parede é a mesma, independentemente da posição do isolamento. Assim, as diferenças de pressão também se equivalem.

Os valores extremos apresentam diferenças de pressão menores, o que implica um maior risco de haver condensação nesse ponto. O mês de Dezembro é aquele que apresenta maior risco de condensação interna, seguido do mês de Fevereiro.

A Interface 2 compreende a fronteira entre o isolamento térmico e o pano de alvenaria, quando o isolamento térmico é colocado pelo exterior. Quando colocado pelo interior, a interface 2 corresponde à fronteira entre o pano de alvenaria e o isolamento térmico. Nesta região observam-se diferenças que decorrem da posição da camada de isolamento (Figura 3.46).

### Análise Comparativa de Diferentes Modelos de Simulação Numérica na Avaliação da Ocorrência de Condensações Internas

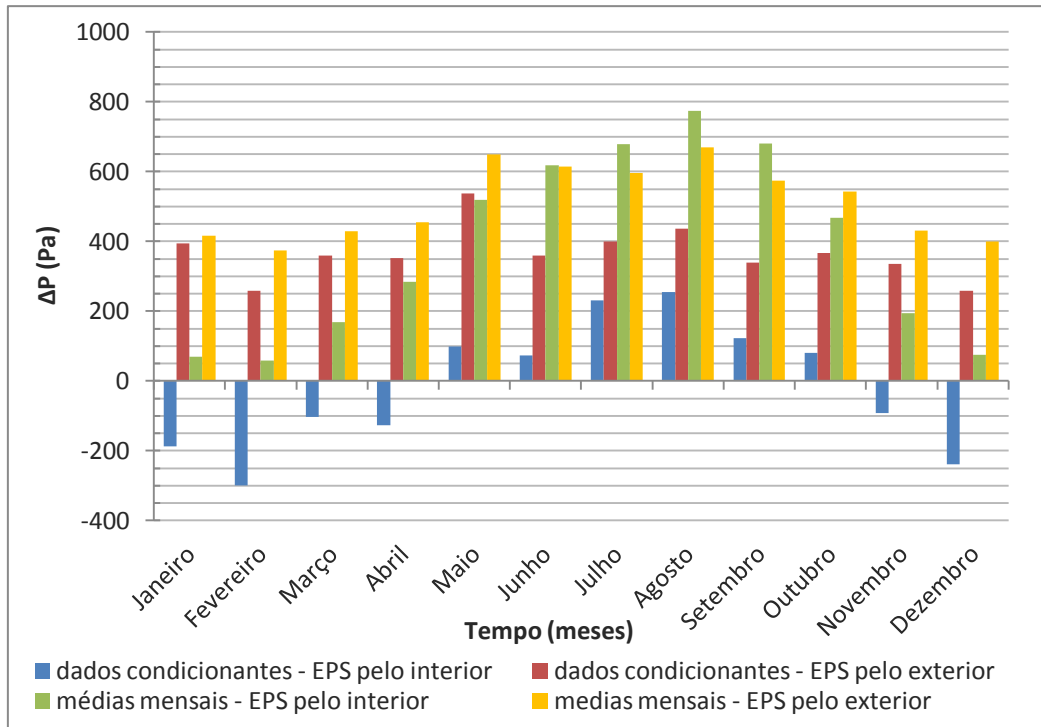


**Figura 3.46 – Interface 2 – Variação da temperatura ao longo do ano para os valores mais condicionantes e valores médios do ambiente exterior, para uma solução com isolamento pelo exterior ou pelo interior**

As temperaturas médias mensais são mais elevadas e atingem, a partir do mês de Junho, um nível superior à temperatura ambiente interior, o que faz com que sejam visíveis as diferenças entre o posicionamento do isolamento térmico. A sua colocação pelo exterior permite atenuar as reduções de temperatura do ambiente exterior, e também os aumentos de temperatura exterior acima da temperatura que se regista no lado interior da parede, que no caso são 18°C. Esta atenuação das amplitudes térmicas, quando o isolamento térmico está presente pelo exterior da solução construtiva, deve-se à maior inércia térmica deste tipo de solução construtiva, que contabiliza toda a massa da parede que se encontra desde o isolamento térmico até ao interior (Henriques,2011).

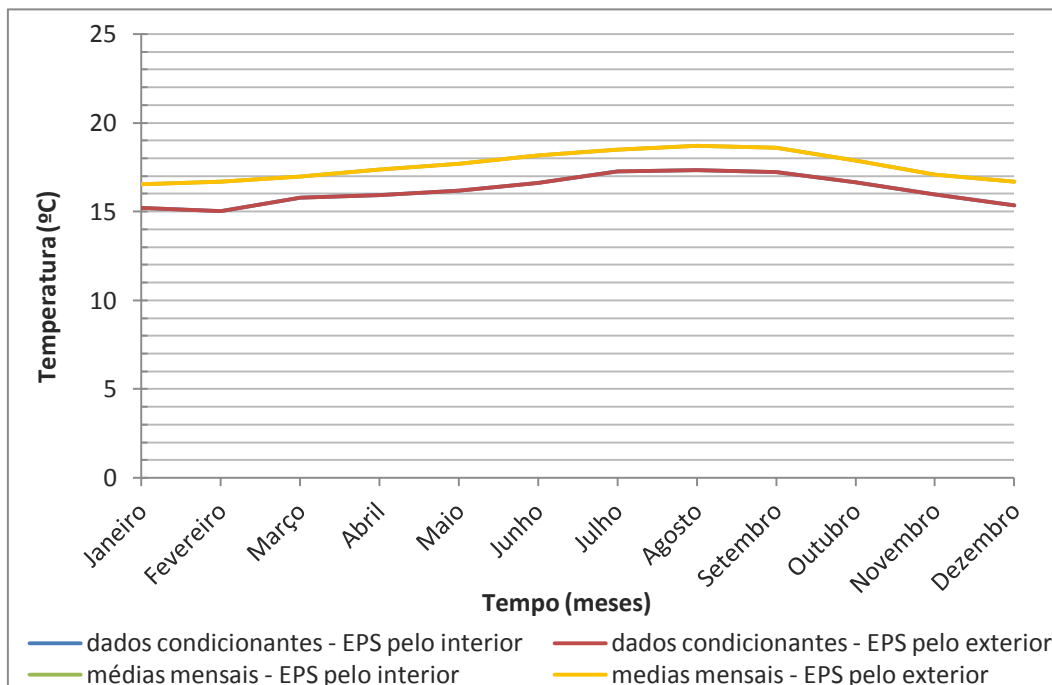
Pelo gráfico que trata a diferença de pressão (Figura 3.47), verifica-se que ocorrem condensações nos meses de Fevereiro e Dezembro, pois registam-se diferenças de pressão negativa, o que significa que a pressão parcial excede a pressão de saturação.





**Figura 3.47 – Interface 2 – Diferenças de Pressão correspondentes aos dados médios e mais condicionantes mensais, considerando o isolamento térmico colocado pelo exterior ou pelo interior**

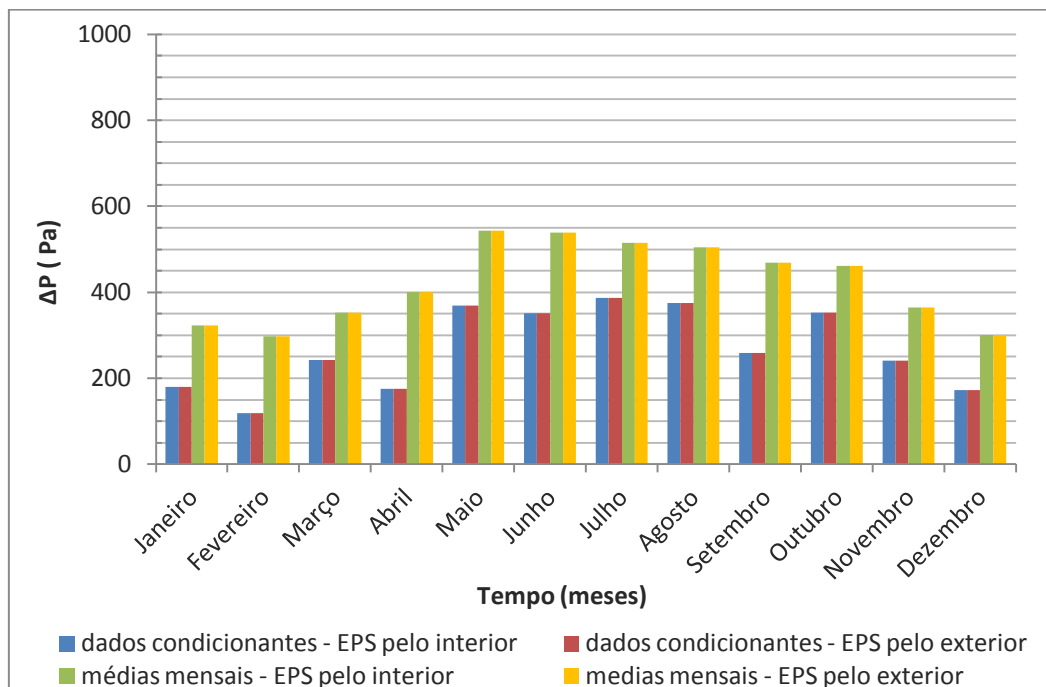
Na Interface 3 as temperaturas são as mesmas para os valores extremos e para os valores médios de cada mês, qualquer que seja a posição do isolamento térmico (Figura 3.48).



**Figura 3.48 – Interface 3 – Variação da temperatura ao longo do ano para os valores mais condicionantes e valores médios do ambiente exterior, para uma solução com isolamento pelo exterior ou pelo interior**

Esta interface tem sempre a mesma temperatura independentemente da ordem das camadas que a precedem, dado que as resistências térmicas do conjunto dessas camadas

será sempre o mesmo. Assim, as diferenças de pressão acompanham a tendência, devido ao facto de haver sempre a mesma resistência à difusão do conjunto de camadas que precede esta interface (Figura 3.49).



**Figura 3.49 – Interface 3 – Diferenças de Pressão correspondentes aos dados médios e mais condicionantes mensais, considerando o isolamento térmico colocado pelo exterior ou pelo interior**

Dado ser a interface que está mais afastada do ambiente exterior, os dados mensais e condicionantes são mais aproximados, havendo uma diminuição das diferenças de pressão de uma maneira geral, em comparação com a interface 1.

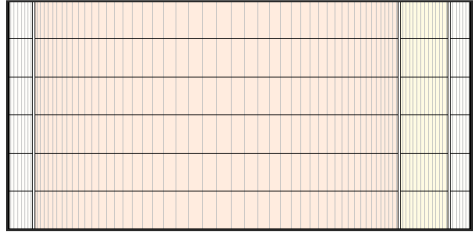
### 3.3.4. Teor de humidade no isolamento térmico

A ocorrência de cargas elevadas de humidade em paredes tem efeitos na condutibilidade térmica dos materiais que as constituem, principalmente nos materiais de isolamento térmico. O conseqüente aumento da condutibilidade térmica no isolamento térmico reduz a resistência térmica total do elemento construtivo, baixando a sua qualidade térmica.

#### 3.3.4.1. Teor de humidade em diferentes tipos de isolamento térmico inseridos na mesma solução construtiva

No sentido de determinar o comportamento de quatro tipos diferentes de isolamento térmico (XPS, EPS, PUR, MW) e compará-los entre si, foram introduzidos na mesma solução construtiva, caracterizada pela Tabela 3.17.

**Tabela 3.17 - Caracterização da solução construtiva utilizada na análise de vários isolamentos térmicos na mesma solução construtiva**

<b>Solução Construtiva PS2</b>	
 <p>[1] [2] [3] [4]</p>	<p>[1] – Reboco tradicional de argamassa de cimento e areia (1,5cm)</p> <p>[2] – Alvenaria de tijolo cerâmico furado (22cm)</p> <p>[3] – XPS/EPS/MW/PUR (3cm)</p> <p>[4] – Placa de gesso cartonado (1,25cm)</p>
Espessura [cm]	28
U [W/m <sup>2</sup> .K]	0,63

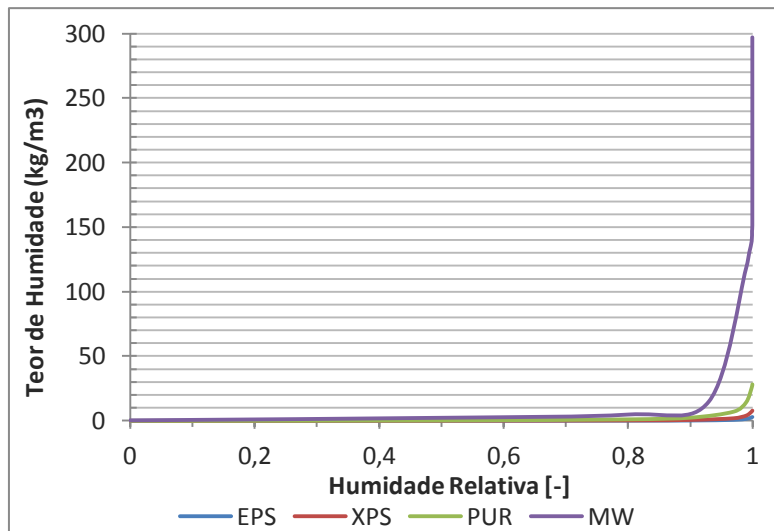
Os materiais de isolamento térmico possuem características diversificadas, que estão representadas na Tabela 3.18. As diferenças são mais acentuadas no factor de resistência à difusão de vapor,  $\mu$ , que varia entre o valor mínimo de 1 correspondente à lã mineral, passando pelos valores intermédios de 60, do poliestireno expandido e espuma rígida de poliuretano, até ao valor máximo de 150, do poliestireno expandido extrudido.

**Tabela 3.18 – Parâmetros básicos dos materiais de isolamento térmico utilizado**

Material	Massa volúmica, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Porosidade, $n$ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Calor específico, $c$ (J/kg.K)	Condutibilidade térmica, $\lambda$ (W/m.K)	Factor de resistência à difusão de vapor, $\mu$ (-)
XPS	40	0,95	1450	0,037	150
EPS	30	0,95	1450	0,037	60
PUR	40	0,95	1400	0,040	60
MW	60	0,95	1030	0,040	1

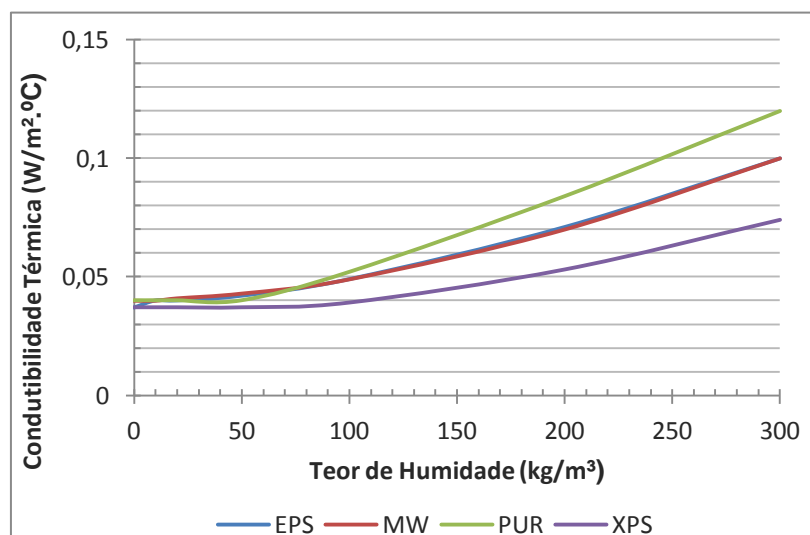
As fontes donde foram retirados os valores encontram-se no Anexo B – Tabela 15. Em termos de parâmetros adicionais, foram adaptados aos materiais as *curvas de armazenamento de humidade* representadas pela Figura 3.50, retiradas da *North American Database* para o XPS, EPS e PUR, e da *Fraunhofer IBP* foi adaptada a *curva de armazenamento de humidade da Mineral Insulation Board*.

## Análise Comparativa de Diferentes Modelos de Simulação Numérica na Avaliação da Ocorrência de Condensações Internas



**Figura 3.50 – Curva de armazenamento de humidade para quatro tipos de isolamento térmico**

Verifica-se que a lã mineral possui uma *curva de armazenamento de humidade* que abrange valores de teor de humidade com uma maior ordem de grandeza relativamente aos outros materiais considerados. A curva do poliuretano atinge valores superiores aos poliestirenos, que apresentam curvas muito aproximadas entre ambos, dado serem o mesmo material trabalhado de modo diferente. Em conjunto com as curvas de armazenamento de humidade referidas, foram também adaptadas as curvas que relacionam a condutibilidade térmica com o teor de humidade do material, representadas na Figura 3.51.



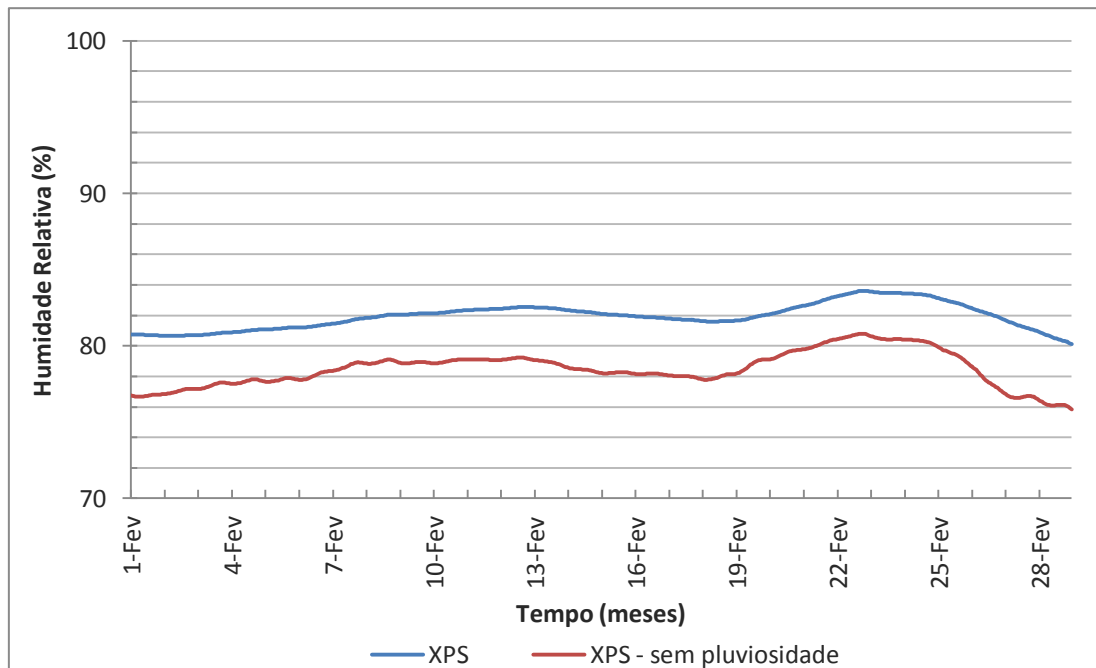
**Figura 3.51 – Condutibilidade térmica em função do teor de humidade utilizada no WUFI**

Verifica-se uma maior influência do teor de humidade na condutibilidade térmica para o caso da espuma rígida de poliuretano (PUR), a lã mineral (MW) apresenta uma curva semelhante ao poliestireno expandido (EPS), e o poliestireno expandido extrudido (XPS) apresenta o menor aumento de condutibilidade térmica à medida que aumenta o teor de humidade. Para teores muito baixos, a variação de condutibilidade apresenta-se muito baixa.

O período de análise do elemento construtivo corresponde ao mês de Fevereiro. Deste modo, é possível analisar de forma mais concreta o comportamento do isolamento térmico nos períodos gravosos, quando o fluxo de vapor de água é dirigido para o exterior. Assim, analisando o centro da camada é possível determinar o andamento da humidade relativa com presença ou ausência de pluviosidade incidente na fachada. No período que se segue ao dia 21 de Fevereiro, que constitui o dia em que ocorrem piores condições no ambiente exterior, verifica-se o comportamento em função de cada tipo de isolamento térmico. Os valores de teor de humidade determinados correspondem ao valor médio de toda a camada de isolamento térmico, retirado do WUFI.

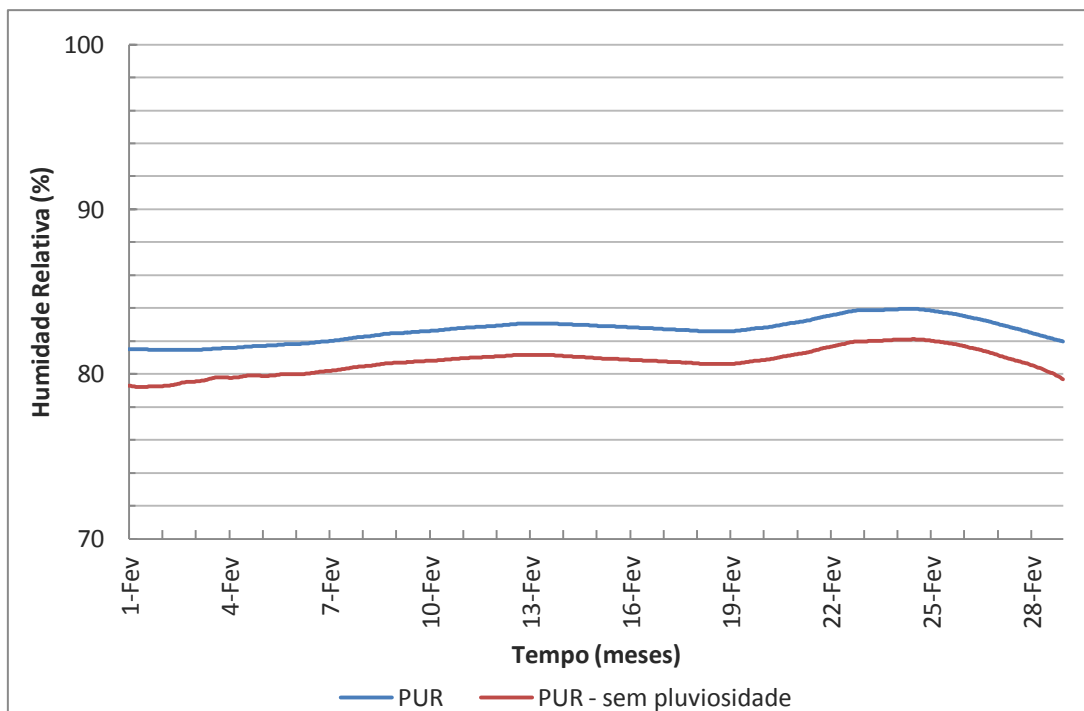
### **Análise dos resultados**

O andamento da humidade relativa no centro das camadas de cada isolamento térmico foi traduzido em quatro gráficos, apresentados seguidamente.

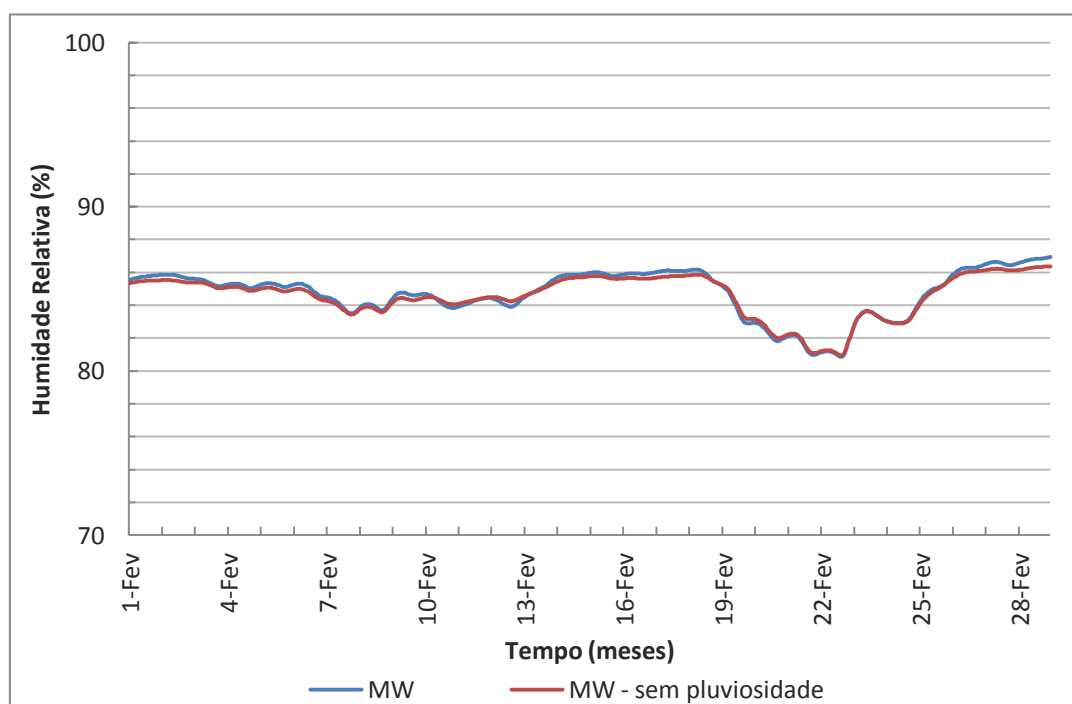


**Figura 3.52 – Humidade relativa na camada de poliestireno expandido extrudido (XPS) durante o mês de Fevereiro, com presença e ausência de pluviosidade incidente na fachada**

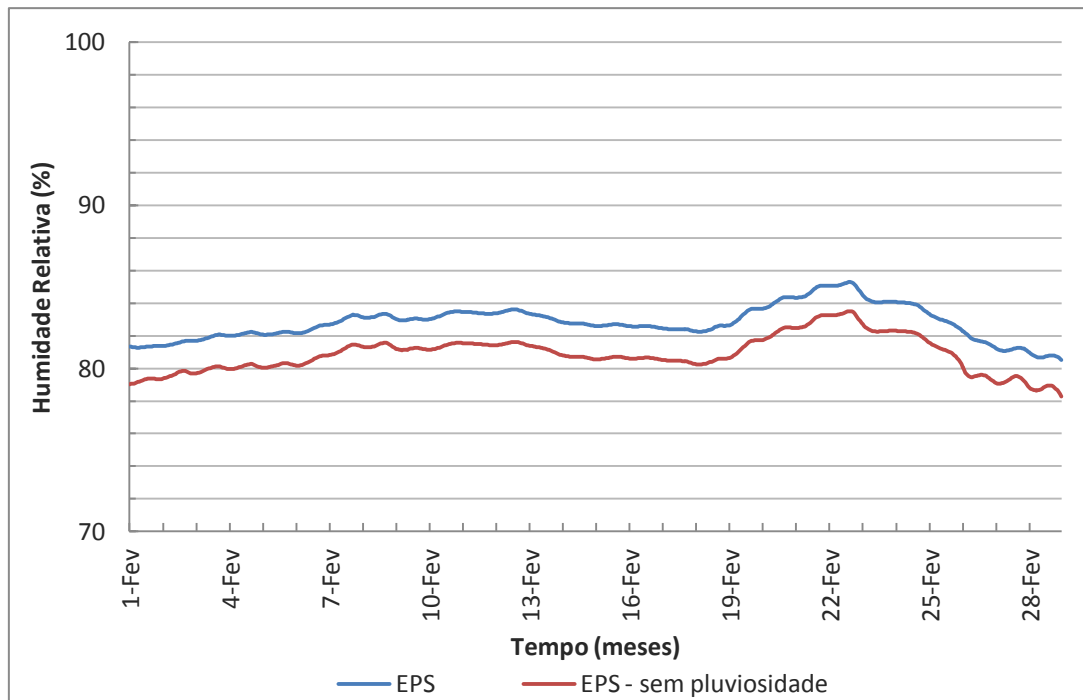
**Análise Comparativa de Diferentes Modelos de Simulação Numérica na Avaliação da Ocorrência de Condensações Internas**



**Figura 3.53 - Humidade relativa na camada de espuma rígida de poliuretano (PUR) durante o mês de Fevereiro, com presença e ausência de pluviosidade incidente na fachada**



**Figura 3.54 – Humidade relativa na camada de lã mineral (MW) durante o mês de Fevereiro, com presença e ausência de pluviosidade incidente na fachada**

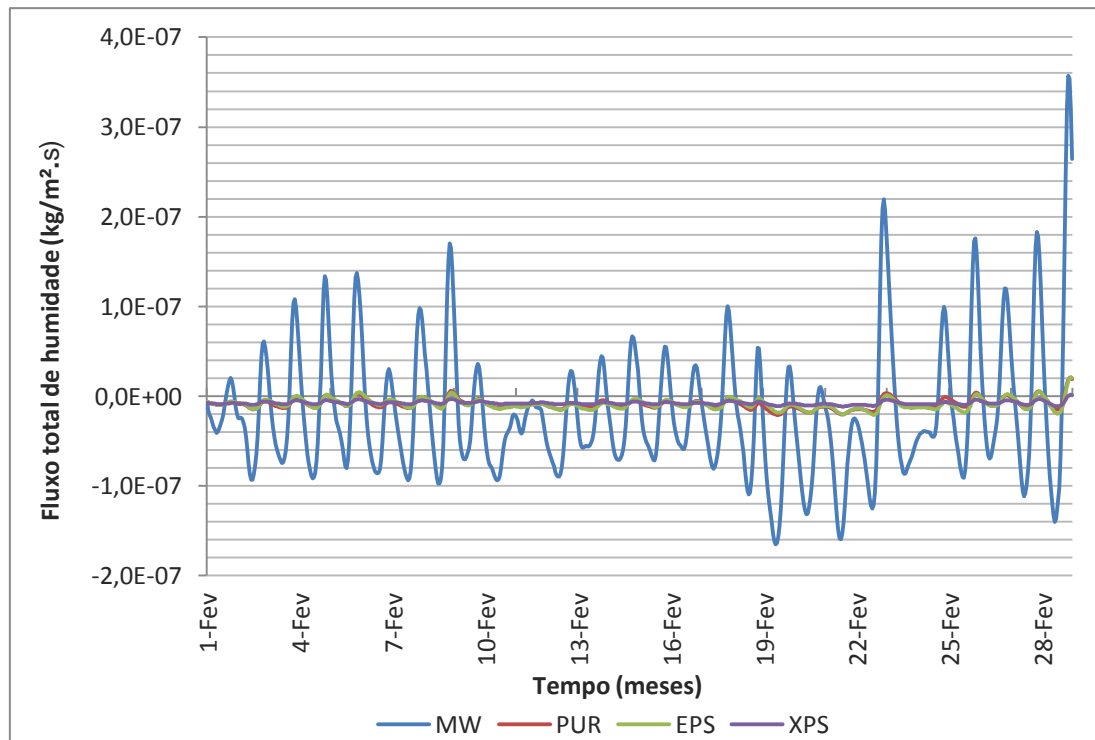


**Figura 3.55 - Humidade relativa na camada de poliestireno expandido (EPS) durante o mês de Fevereiro, com presença e ausência de pluviosidade incidente na fachada**

Em cada um dos gráficos, verifica-se que a humidade relativa inicial no centro das camadas não é o mesmo, embora todas tenham tido uma humidade relativa inicial muito próxima do  $w_{80}$ . Como a análise é realizada para o mês de Fevereiro do último ano de simulação, os efeitos do comportamento de cada um dos materiais vai ter repercussão na humidade relativa que possuem no início do mês.

Verifica-se que os materiais que possuem uma menor permeabilidade ao vapor de água, que corresponde a valores mais elevados do factor de resistência à difusão,  $\mu$ , têm um comportamento semelhante. Existe uma diferença entre a humidade relativa com pluviosidade e sem pluviosidade incidente na parede, desde o início do mês, e que se prolonga durante o mês de Fevereiro. Esta diferença é mais pequena na lã mineral, comparativamente com os outros materiais. Nos períodos em que o fluxo de vapor direccionado para o exterior é mais forte, às 8h do dia 21 de Fevereiro, a lã mineral regista uma diminuição da sua humidade relativa (Figura 3.54), nos restantes materiais regista-se um aumento da humidade relativa no centro da camada (Figura 3.52, Figura 3.53, Figura 3.55).

Para explicar esta diferença, foram analisadas as fronteiras do isolamento térmico a nível de fluxos totais de humidade na forma líquida e de difusão de vapor. Um fluxo de humidade positivo indica que o vapor de água se dirige no sentido desde o ambiente exterior para o ambiente interior, se for negativo, dirige-se no sentido contrário (Figura 3.56).

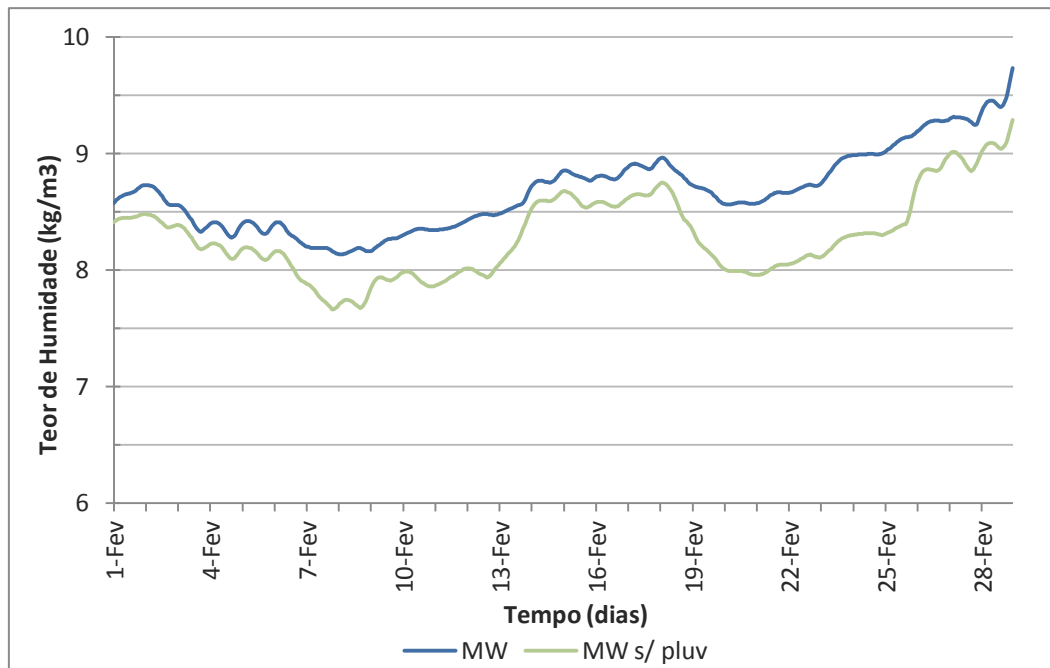


**Figura 3.56 – Fluxo total de humidade na face exterior do isolamento térmico, para diferentes tipos de material de isolamento térmico**

A diferença entre a transferência de humidade na face exterior dos diferentes materiais estudados é marcada pela dimensão elevada dos fluxos correspondentes à lã mineral relativamente aos restantes materiais. Esta diferença faz com que esta camada possua uma acumulação muito rápida de humidade nas suas faces, e uma variação também muito rápida e muito influenciada pelos fluxos de vapor de água. Nos restantes materiais, onde a permeabilidade ao vapor é mais baixa, há uma maior dificuldade do vapor em atravessar o material e o nível de humidade mantém-se mais regular ao longo da espessura da camada.

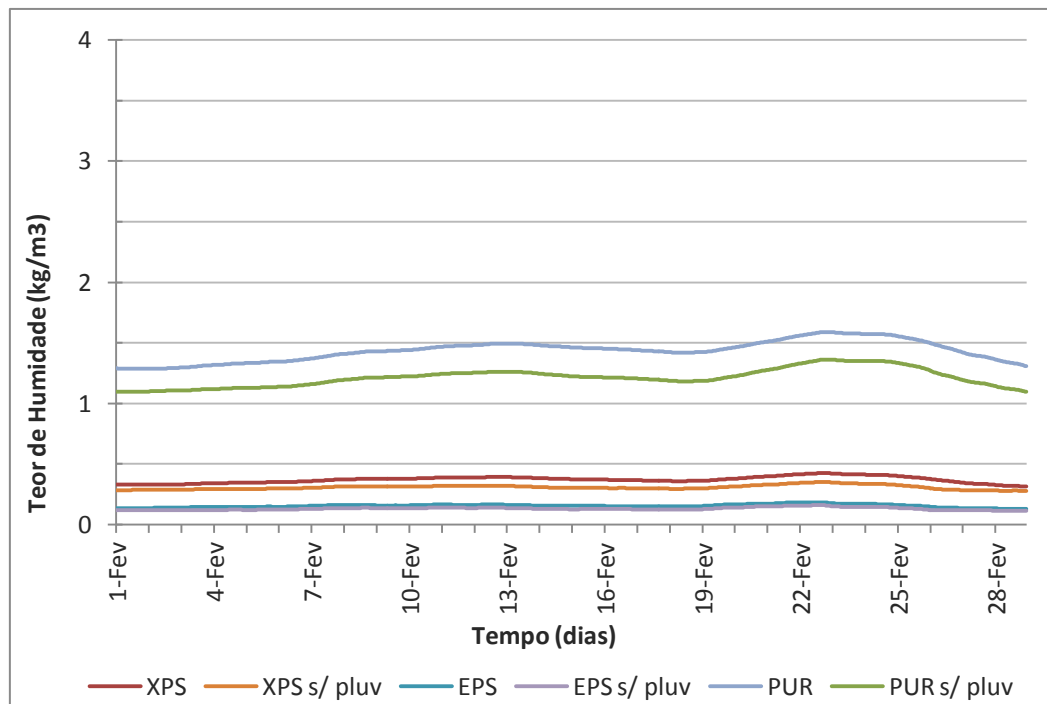
É possível também realizar uma análise do teor de humidade médio de toda a camada, nos diferentes materiais, representados na Figura 3.57 e Figura 3.58.





**Figura 3.57 – Teor de humidade da lã mineral (MW) numa solução construtiva com isolamento térmico pelo interior**

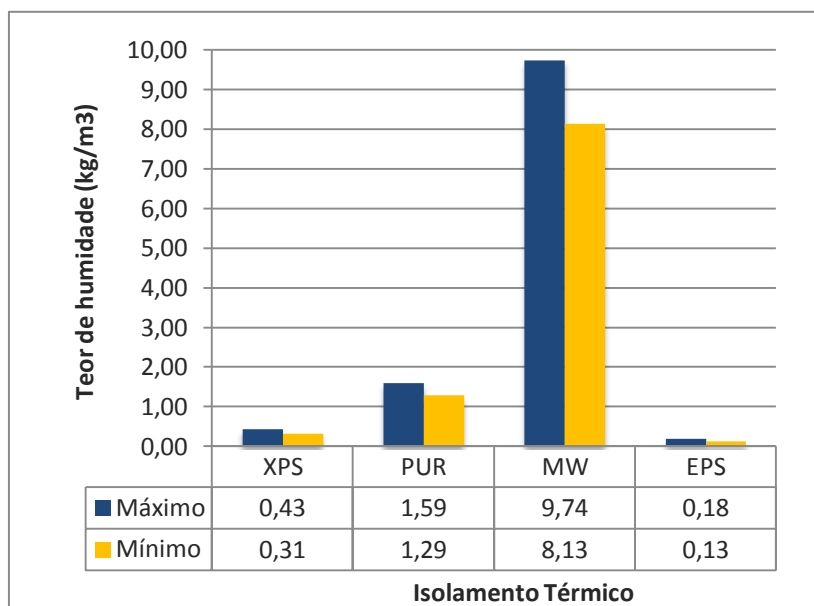
Na lã mineral ocorrem os valores mais elevados de teor de humidade ao longo do mês, havendo um decréscimo destes valores quando ocorrem humidades relativas elevadas e temperaturas muito baixas no ambiente exterior, devido a um fluxo de vapor direccionado para o exterior. Este fluxo provoca a perda de vapor de água para o material vizinho, do lado exterior. Os restantes materiais estão representados na Figura 3.58.



**Figura 3.58 – Teor de Humidade de diferentes tipos de isolamento térmico numa solução construtiva com isolamento pelo interior**

Nestes casos ocorre o fenómeno contrário ao da lã mineral, dado que nos períodos mais gravosos os valores de teor de humidade aumentam, de acordo com as humidades relativas abordadas anteriormente. A variação da humidade relativa e a *curva de armazenamento de humidade* de cada material provocam variações no teor de humidade global da camada de isolamento térmico para os diferentes materiais ensaiados.

Na Figura 3.59 estão representados os valores máximos e mínimos de teor de humidade que se obtém para cada material simulado.



**Figura 3.59 – Teor de humidade máximo e mínimo para vários tipos de isolamento térmico numa solução de parede simples com isolamento colocado pelo interior**

Os valores mais elevados ocorrem na lã mineral, dado que a fácil migração do vapor de água permite que se acumulem quantidades elevadas nas faces do material. A partir destas concentrações elevadas de vapor de água, e consequente aumento da humidade relativa, a *curva de armazenamento de humidade* atribui teores de humidade mais elevados na lã mineral (Figura 3.50). Os restantes materiais apresentam teores de humidade muito inferiores, e não existe uma grande influência da pluviosidade incidente. A verificação dos teores de humidade obtidos, nas curvas que representam a variação da condutibilidade térmica com o teor de humidade (Figura 3.51), indicam que a condutibilidade térmica não é muito influenciada por estes valores para nenhum dos materiais.

#### **3.3.4.2. Análise das condições na fronteira e no centro do isolamento térmico para o conjunto de soluções de parede simuladas**

É importante determinar as condições do isolamento térmico, quando inseridas em diferentes soluções construtivas, de modo a perceber em que medida é afectada a

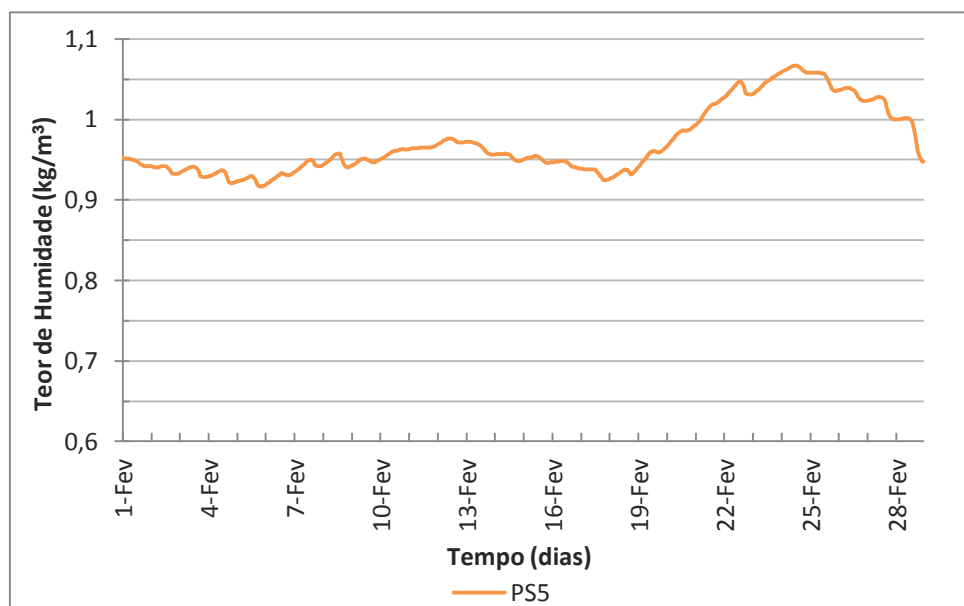
condutibilidade térmica do material. Possibilita também a definição de quais as soluções construtivas que melhores condições asseguram ao isolamento térmico.

Foram consideradas as soluções construtivas simuladas no sub-capítulo 3.3, nas quais foram analisados os resultados de teor de humidade correspondentes a toda a espessura da camada de isolamento térmico. Em seguida apresentam-se e analisam-se os resultados obtidos em teor de humidade e com uma análise dos fluxos totais de humidade, por transporte capilar e por difusão de vapor, associados a cada solução construtiva.

### **Análise dos resultados**

Os resultados permitem perceber quais as soluções construtivas que possuem maior teor de humidade durante o mês de Fevereiro, considerando a precipitação incidente, e com poliestireno expandido extrudido (XPS) aplicado como isolamento térmico.

Na Figura 3.60 está representado o teor de humidade na solução construtiva PS5, que é uma solução de parede simples revestida com uma chapa metálica ( $S_d = 10000\text{m}$ ) na sua face exterior, com isolamento térmico aplicado na face exterior da alvenaria de tijolo cerâmico furado.

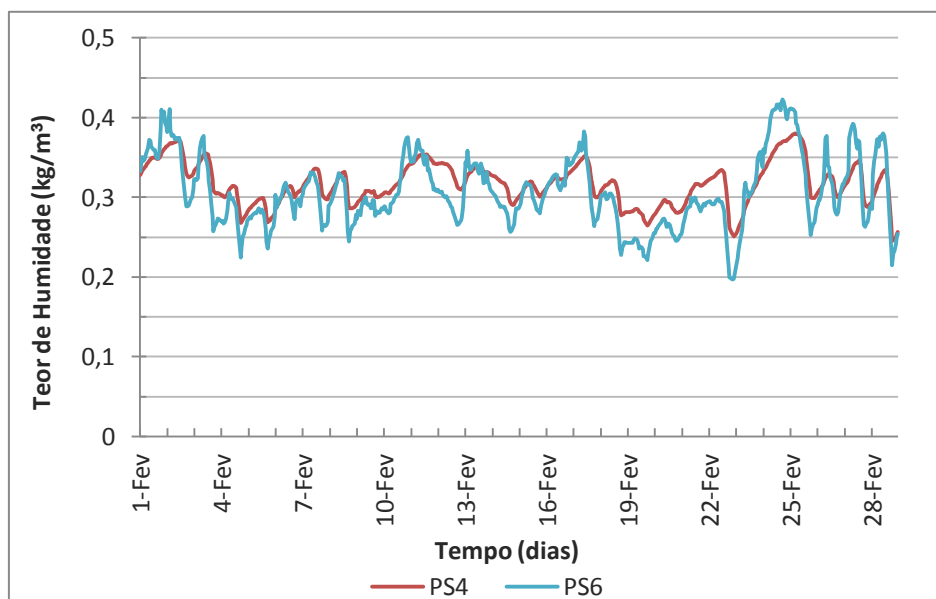


**Figura 3.60 – Teor de humidade do isolamento térmico na solução construtiva PS5**

A solução construtiva PS5 é aquela que possui o maior teor de humidade no isolamento térmico. Isto ocorre por possuir um revestimento que impede a difusão de vapor para o ambiente exterior, devido ao facto de possuir um factor de resistência à difusão de vapor muito elevado. O isolamento térmico está, deste modo, sujeito a humidades relativas

próximas dos 100%, que aumentam nos períodos de tempo com temperaturas mais baixas e humidades relativas mais elevadas no ambiente exterior.

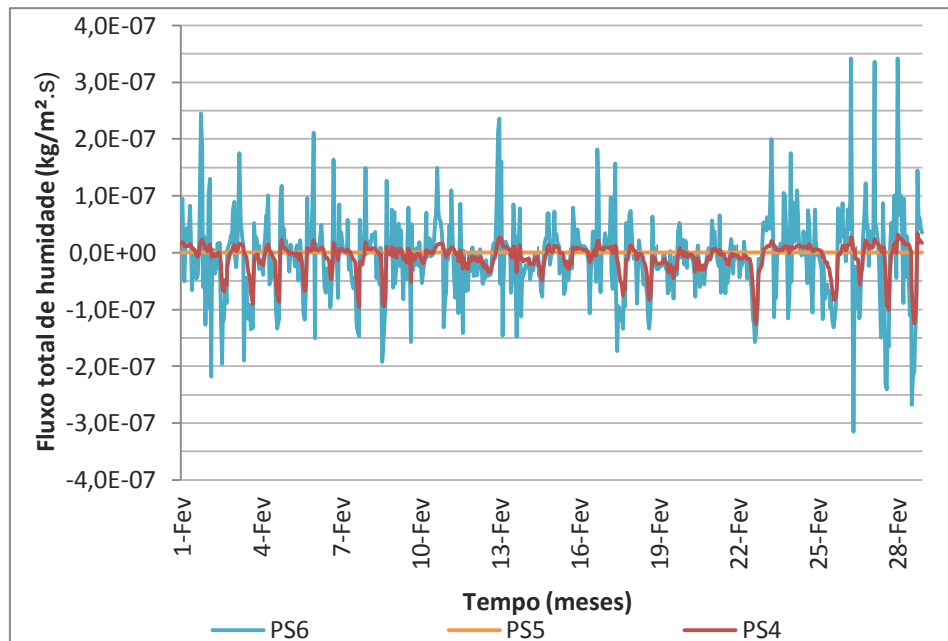
Na Figura 3.61 estão representadas as soluções construtivas PS4 e PS6, que possuem um revestimento delgado à base de ligantes minerais sobre isolamento térmico ( $S_d = 0,2m$ ) e um revestimento colocado de forma independente do suporte ( $S_d = 0m$ ), respectivamente. Tratam-se de soluções de parede simples com isolamento aplicado na face exterior do pano de alvenaria, tal como a solução PS5.



**Figura 3.61 – Teor de humidade do isolamento térmico nas soluções construtivas PS5 e PS6**

As soluções construtivas PS4 e PS6 possuem um nível de teor de humidade semelhante, ao longo do mês de Fevereiro. Estas soluções diferenciam-se da solução PS5 por possuírem um revestimento exterior com uma resistência à difusão de vapor de água muito inferior. O andamento dos teores de humidade apresenta uma flutuação muito maior.

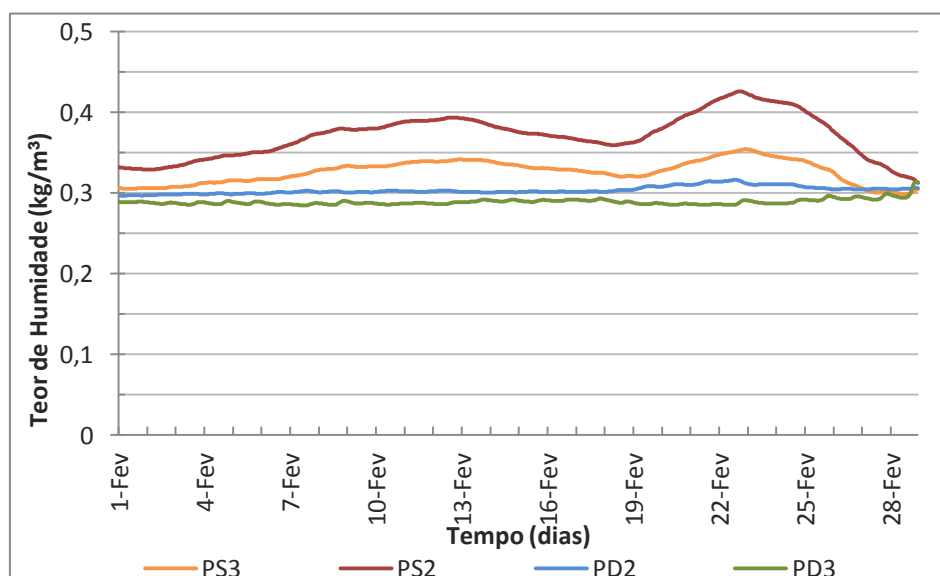
Existe uma maior facilidade em perder vapor de água da camada de isolamento por parte da solução PS6, como é evidenciado pela Figura 3.62, onde estão representados os fluxos totais de humidade na face exterior do isolamento térmico ao longo do mês de Fevereiro.



**Figura 3.62 – Fluxos totais de humidade na face exterior do isolamento térmico, para as paredes PS4, PS5 e PS6.**

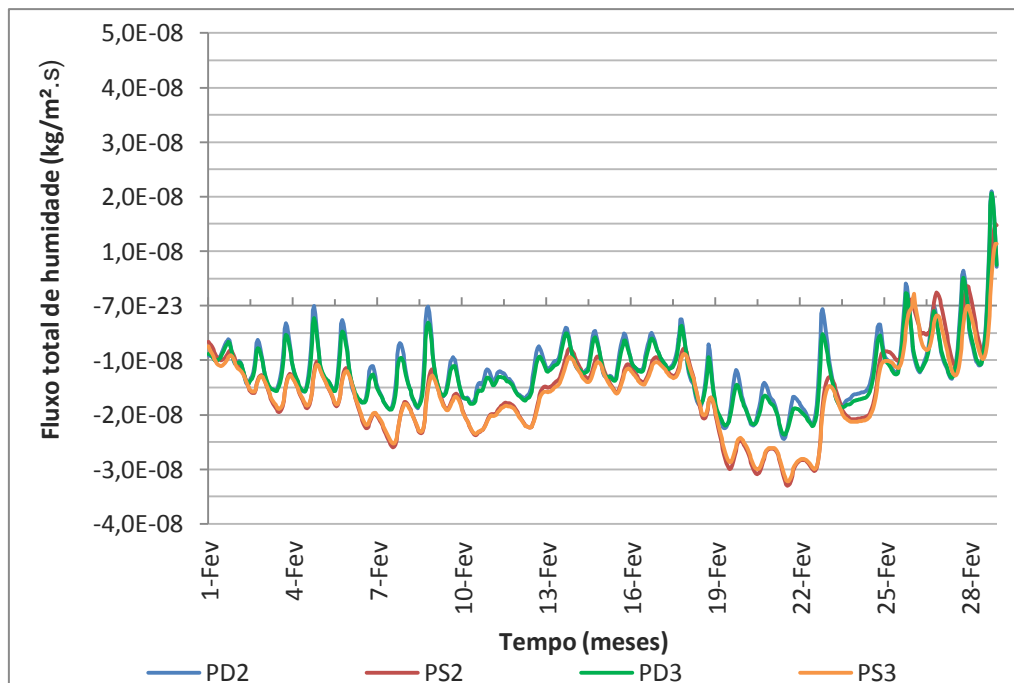
Comparando os fluxos totais de humidade na superfície exterior do isolamento térmico, existe uma maior fluatuabilidade dos fluxos de humidade da solução PS6, o que comprova a maior capacidade da camada de isolamento térmico em perder vapor de água para o exterior relativamente às outras soluções de parede simples e isolamento colocado pelo exterior.

Nas soluções que possuem o isolamento térmico colocado entre dois panos de alvenaria ou colocados pelo interior da parede, a solução PS2 apresenta os resultados mais gravosos, seguida das soluções PS3, PD2 e PD3 (Figura 3.63).



**Figura 3.63 – Teor de humidade do isolamento térmico para as soluções PS2, PS3, PD2 e PD3**

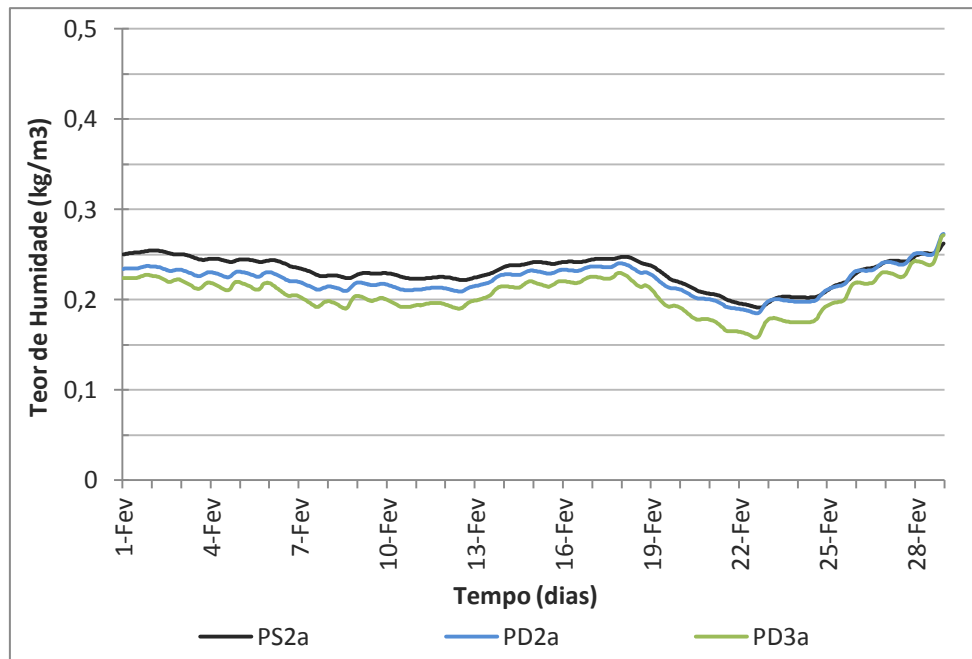
As soluções de parede com apenas um pano de alvenaria de tijolo de 22cm apresentam maiores teores de humidade no isolamento térmico, devido ao facto de haver maior exposição deste a um ambiente interior sobreocupado. O facto de existir um pano interior de alvenaria nas paredes PD2 e PD3 faz com que a resistência à difusão total das camadas dispostas até ao interior seja superior à resistência unicamente da placa de gesso cartonado. A Figura 3.64 representa os fluxos de humidade associados a cada solução construtiva, na face interior do isolamento térmico.



**Figura 3.64 - Fluxos totais de humidade na face interior do isolamento térmico, para as paredes PD2, PS2, PD3 e PS3**

Ao analisar os fluxos, verifica-se que há uma correspondência entre estes e os valores de teor de humidade correspondentes a cada solução construtiva. As paredes simples possuem fluxos de humidade mais elevados porque não possuem um pano interior de alvenaria que dificulte a migração de humidade até ao isolamento térmico. O contrário acontece nas paredes duplas, onde estes fluxos são diminuídos.

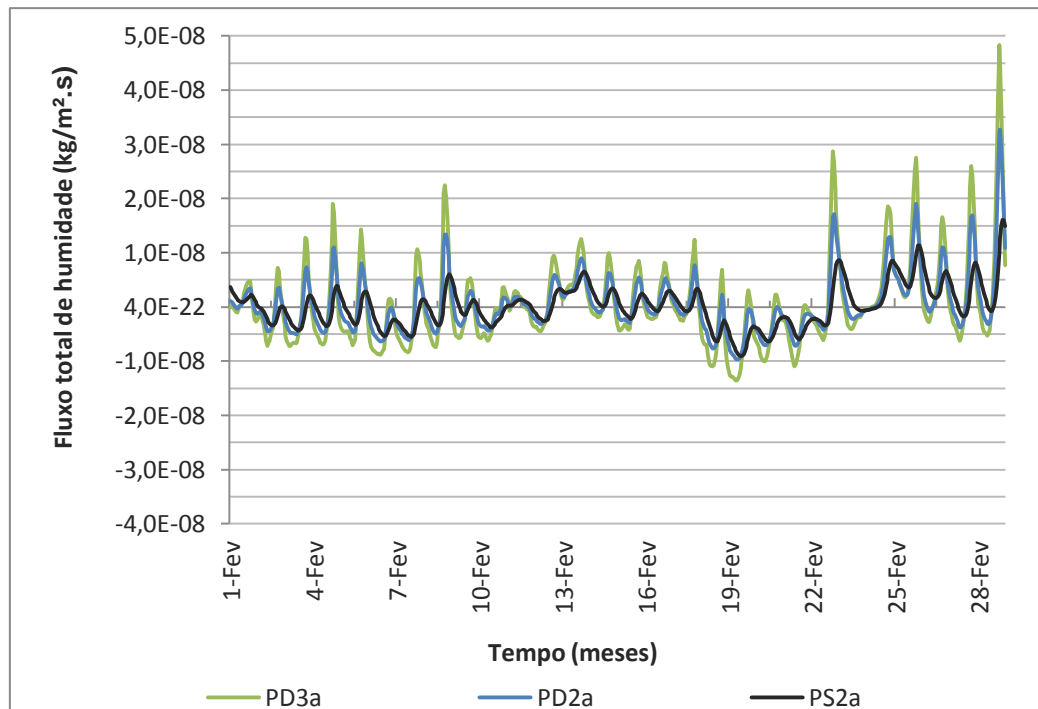
A colocação de barreiras pára-vapor na face interior do isolamento térmico está representada na Figura 3.65.



**Figura 3.65 – Teor de humidade do isolamento térmico para as soluções construtivas PS2a, PD2a e PD3a com presença e ausência de pluviosidade**

Nestes casos ocorre uma redução do teor de humidade do isolamento térmico nos dias mais chuvosos, relativamente ao clima exterior. A presença desta barreira ( $S_d=1500m$ ) permite que não haja um acréscimo de humidade no isolamento térmico, desde o interior, o que faz com que camadas que estão dispostas após a barreira não recebam mais vapor de água. Deste modo, há um abaixamento do teor de humidade no isolamento térmico, para os três casos que foram estudados. Ao analisar os fluxos totais de humidade na face exterior do isolamento térmico (Figura 3.66) para as três soluções construtivas é possível determinar as trocas que ocorrem entre o isolamento térmico e o pano de alvenaria, ou lâmina de ar no caso da solução PD3a. Um fluxo dirigido para o ambiente exterior é negativo e para o ambiente interior é positivo.

### Análise Comparativa de Diferentes Modelos de Simulação Numérica na Avaliação da Ocorrência de Condensações Internas

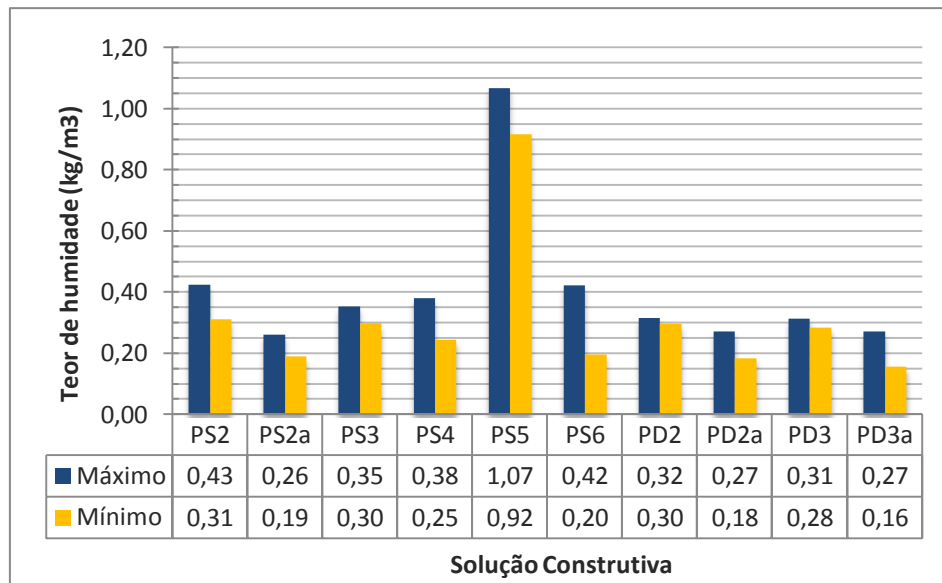


**Figura 3.66 – Fluxos totais de humidade na face exterior do isolamento térmico, para as paredes PD3a, PD2a e PS2a**

Estes fluxos de humidade correspondem à face exterior do isolamento térmico, e é possível medir a humidade que se transfere do isolamento térmico para as camadas adjacentes. Nesta região ocorre apenas difusão de vapor, sendo que o transporte capilar de humidade tem valores muito reduzidos. A solução PD3a possui maior facilidade em perder vapor de água e em receber, dado que tem uma lâmina de ar adjacente, com um factor de resistência à difusão de vapor,  $\mu$ , inferior à unidade. Daí resultam os fluxos mais elevados, ao contrário das outras soluções, PD2a e PS2a, onde a presença de um pano de alvenaria dificulta a perda de vapor de água, devido a um valor de  $\mu$  mais elevado.

Analisando a Figura 3.67, determinam-se as soluções construtivas onde o isolamento térmico possui teores de humidade mais elevados.





**Figura 3.67 – Teores de humidade máximos e mínimos, para diferentes soluções construtivas para o mês de Fevereiro**

A solução PS5 possui os valores mais elevados de teor de humidade, e as soluções com barreira pára-vapor apresentam uma redução dos valores máximos, relativamente às soluções onde essa camada não foi incluída.

Analisando as diferenças entre os teores máximos e mínimos, verifica-se que as soluções com isolamento pelo interior e em posições intermédias possuem diferenças menores, comparativamente com as soluções com o isolamento térmico aplicado pelo exterior.

Verifica-se também que nas soluções de parede simples com um pano de alvenaria de 22cm de espessura, a presença de uma lâmina de ar diminui o teor de humidade máximo na camada de isolamento térmico (PS2 e PS3). No caso de uma parede dupla com um pano exterior de alvenaria de 11 cm, a diferença entre os teores de humidade é residual (PD2 e PD3).

Os teores de humidade que se observam neste caso não influenciam muito a condutibilidade térmica do material considerado, o poliestireno expandido extrudado (XPS). Este efeito pode ser verificado através das curvas de variação da condutibilidade térmica em função do teor de humidade presentes na Figura 3.51.



## **4. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

### **4.1. Conclusões**

O estudo realizado sobre o comportamento higrotérmico de diferentes soluções construtivas permitiu obter conhecimentos acerca do efeito que um conjunto de parâmetros tem na humidade da parede. Os casos analisados e as principais conclusões das simulações realizadas no WUFI apresentam-se seguidamente.

#### **Orientação da fachada**

As paredes exteriores que estejam expostas às orientações Oeste e Sudoeste sofrem a ocorrência de humidades relativas mais elevadas comparativamente com as restantes orientações, caso não possuam um revestimento de estanquidade que impeça a penetração de humidade de precipitação.

Os níveis de humidade relativa registados são influenciados sobretudo pela radiação solar incidente na parede, que provoca um aumento dos valores mínimos e máximos de humidade relativa, em especial nas orientações que recebem maior quantidade de radiação solar.

Os fluxos de humidade por transporte líquido diminuem à medida que se avança em profundidade na parede, entre a face interior do reboco exterior e o centro do pano de alvenaria, onde os valores são inferiores na ordem do milhar.

#### **Tonalidade da fachada**

A tonalidade de uma parede exterior está relacionada com as temperaturas atingidas à sua superfície, sendo as temperaturas mais elevadas no caso de tonalidades mais escuras, e mais baixas no caso de tonalidades mais claras.

As diferentes temperaturas atingidas à superfície condicionam a humidade relativa em profundidade, dando melhores condições de secagem quando as temperaturas são mais elevadas, e o contrário, quando estas se apresentam mais baixas. Deste modo, uma tonalidade mais escura vai diminuir a humidade relativa da solução construtiva, e uma tonalidade mais clara sujeita a solução construtiva a uma humidade relativa mais elevada.

### **Espessura do pano de alvenaria**

A utilização de diferentes espessuras no pano de alvenaria de tijolo furado resulta em diferenças entre a humidade relativa em toda a espessura do material. As maiores espessuras acumulam mais humidade ao contrário das espessuras mais finas. O humedecimento ocorre mais rapidamente numa parede com menor espessura, o mesmo acontece com a sua secagem.

### **Normas EN13788 e EN15026**

As cargas de humidade interior investigadas indicam que a norma EN13788 produz as humidades relativas mais elevadas no pano de alvenaria da parede, comparativamente com a norma EN15026, para os dois escalões de humidade escolhidos. Dentro da norma EN13788, o nível 4, que pretende simular um ambiente sobreocupado de uma habitação é a opção que indica os valores de humidade relativa mais elevados.

Assim, uma solução construtiva de parede simples orientada a Oeste, revestida com um material de tonalidade branca, com um pano de alvenaria de espessura inferior a 22cm e uma carga de humidade interior, correspondente a um edifício sobreocupado (norma EN13788, nv.4), apresenta as condições de humidade relativa mais gravosas no seu interior. Estas condições resultam da conjugação da pluviosidade incidente e más condições de secagem proporcionadas pela intensidade de radiação solar recebida e pela tonalidade do revestimento que possui.

### **Simulação de soluções construtivas de parede em regime variável e estacionário**

As diversas soluções construtivas simuladas em regime variável, considerando as opções exteriores mais desfavoráveis no ambiente interior e exterior, não apresentam a ocorrência de condensações internas por *saturação máxima* (humidade relativa de 100%). Nas soluções construtivas de parede com isolamento pelo interior, verificam-se em todos os casos humidades relativas elevadas na sua região exterior, potenciadas pela humidade de precipitação incidente pela fachada. Apenas ocorrem condensações por *saturação máxima* quando se coloca uma barreira pára-vapor sobredimensionada adjacente ao isolamento térmico. Neste caso as condensações ocorrem de forma inversa, na face exterior da barreira, em períodos de fluxo de vapor dirigido para o interior, nos meses mais quentes, baixando a humidade nos meses mais frios.

O isolamento térmico varia de posicionamento de acordo com cada solução construtiva simulada, o que permite uma análise dos efeitos resultantes:

- O posicionamento do isolamento térmico pelo exterior permite reduzir as variações térmicas em toda a extensão da parede, diminuindo os níveis de humidade relativa máximos que são atingidos nos períodos em que o clima exterior é mais frio e húmido. Deste modo é diminuído o risco de ocorrência de condensações internas;
- A colocação do isolamento térmico numa zona intermédia da parede, como no caso das paredes duplas, produz condições distintas entre o pano exterior e interior. Diminuem as flutuações de temperatura e humidade relativa no pano interior, mas no pano exterior mantém-se uma grande variação de temperatura e humidade relativa;
- Nas paredes simples com isolamento colocado pelo interior, a parede está sujeita às variações térmicas do exterior em maior profundidade, comparativamente com os outros tipos de parede.

Foi também realizada neste trabalho uma comparação entre o regime estacionário, aplicado pelo método de Glaser e o regime dinâmico, aplicado pelo WUFI. Desta comparação retiram-se as seguintes conclusões:

- As simulações realizadas pelo método de Glaser são as únicas que apresentam risco de ocorrência de condensações internas nos elementos construtivos, as quais diminuem à medida que a determinação do valor médio de Glaser é calculado com valores desde os dados mais condicionantes até aos valores médios mensais;
- O WUFI apresenta-se com valores condicionantes em regiões onde incide pluviosidade, e em soluções construtivas onde haja uma barreira pára-vapor disposta na face interior do isolamento térmico, dado que isso provoca condições menos graves no regime estacionário, que considera apenas a difusão de vapor;
- O WUFI apresenta uma melhor adaptação à realidade, dado que, mesmo em casos em que a pluviosidade incidente esteja inactiva, os valores durante o período do dia mais condicionante são os mais gravosos.
- Existe na metodologia de regime variável uma diferença temporal entre as condições que se verificam no exterior, e que ocorrem em zonas mais interiores da parede. Este factor contribui para um desagravamento nos resultados do WUFI comparativamente com os resultados instantâneos de Glaser.

Na avaliação das interfaces de um elemento construtivo, onde se alterou o posicionamento do isolamento térmico entre o exterior e o interior, pela metodologia de Glaser foram retiradas as seguintes conclusões:

- Os dados horários mais condicionantes de cada mês resultam em valores mais baixos de diferença de pressão em todas as interfaces da parede, o que indica um

maior risco de condensação interna em cada interface. Estes resultados são devidos a uma temperatura mais baixa ao longo do ano para as três interfaces, que diminui à medida que avança na espessura da parede;

- A alteração do posicionamento do isolamento térmico não tem influência nas temperaturas nem na diferença de pressão das interfaces 1 e 3;
- Na interface 2 a alteração do posicionamento do isolamento térmico provoca alterações nos valores médios mensais. A colocação pelo exterior provoca valores mais elevados de temperatura nos meses mais frios, e valores mais baixos nos meses mais quentes, o que indica uma maior absorção das temperaturas mais elevadas e mais baixas do ar exterior. Estas alterações de temperatura têm consequências da pressão de saturação, e consequentemente, nas diferenças de pressão verificadas. As temperaturas mais altas dão origem a diferenças de pressão menores, o que indica menor risco de condensação para o EPS colocado no exterior.

### **Teor de humidade no isolamento térmico**

No estudo que comparou vários tipos de isolamento térmico numa mesma solução construtiva (PS2), e um isolamento térmico (XPS) em várias soluções construtivas retiram-se as seguintes conclusões:

- A lã mineral (MW) apresenta os valores mais elevados de teor de humidade e os menores valores de teor de humidade ocorrem no poliestireno expandido (EPS) como resultado das características das *curvas de armazenamento de humidade* e do seu factor de resistência à difusão de vapor de água;
- Materiais que possuem menor resistência à difusão de vapor de água permitem concentrações mais rápidas e mais elevadas de vapor nas suas faces, dependendo da direcção do fluxo de vapor, o que tem como resultado teores de humidade mais elevados dependendo da sua *curva de armazenamento de humidade*;
- A solução PS5 apresenta os valores mais elevados de teor de humidade no isolamento térmico. As soluções construtivas que apresentam os valores menores são as que possuem barreira pára-vapor aplicada na face interior do isolamento térmico (PS2a,PD2a e PD3a);
- Os teores de humidade analisados não indicam uma grande influência deste parâmetro na condutibilidade térmica dos materiais considerados para ambos os estudos.

## **4.2. Sugestões para desenvolvimentos futuros**

A presente dissertação, que abordou o tema das condensações internas em paredes sujeitas ao clima de Lisboa, pode ser desenvolvida em trabalhos futuros, tanto por uma variação da localização dos elementos construtivos por outras regiões com condições climáticas mais graves, e também por uma diferente escolha do elemento em estudo, podendo o estudo ser alargado a coberturas.

Deste modo, recomendam-se os seguintes desenvolvimentos futuros:

- Utilizar o WUFI para simular um conjunto de soluções construtivas de cobertura de edifícios correntes, de diferentes tipos;
- Realizar uma avaliação dos parâmetros associados ao clima exterior e os seus efeitos em coberturas;
- Avaliar as diferenças entre o regime estacionário e o regime dinâmico quando a solução construtiva é uma cobertura;
- Analisar as soluções construtivas em climas mais frios que o clima de Lisboa.





## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Azevedo, S. C. (2011). Influência do teor de água no comportamento de materiais de construção. Dissertação de Mestrado apresentado na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Monte de Caparica.

Couasnet, Y. (1990). *Les condensations dans les bâtiments*: Guide pratique et éléments d'analyse. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris.

Decreto-Lei n.º 80/2006 de 4 de Abril. *Diário da República I SÉRIE - A*. pp. 2468-2513.

EN 12524 (2000). Building Materials and Products - Hygrothermal Properties - Tabulated Design Values. British Standards, London.

EN 13788 (2001). Hygrothermal Performance of Building Components and Building Elements – Internal Surface Temperature to Avoid Critical Surface Humidity and Interstitial Condensation – Calculation Methods. CEN: Comité Européen de normalisation, Brussels.

EN 15026 (2004). Hygrothermal performance of building components and building elements - Assessment of moisture transfer by numerical simulation. CEN: Comité Européen de normalisation, Brussels.

Freitas, V. P. e Pinto, P. (2003). Humidade na construção – Humidade de condensação.

Henriques, F. (1995). *Humidade em Paredes*. LNEC, Lisboa.

Henriques, F. e Rato, V. M. (2003). *Avaliação do risco de ocorrência de condensações internas em coberturas planas*. Cadernos Edifícios nº3. LNEC, Lisboa.

Henriques, F. (2011). *Comportamento Higrotérmico dos Edifícios*. FCT/UNL, Monte da Caparica.

Jorne, F. (2010). Análise Do Comportamento Higrotérmico De Soluções Construtivas De Paredes Em Regime Variável. Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau Mestre em Engenharia Civil – Perfil de Construção.

Karagiozis, A., Künzeli, H. M. e Holm, A. (2001). WUFI-ORNL/IBP - A North American Hygrothermal Model. *Proceedings for Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings VIII: Integration of Building Envelopes*, December 2-7, Clearwater Beach, Florida.

Krus, M. (1996). *Moisture Transport and Storage Coefficients of Porous Mineral Building Materials - Theoretical Principles and New Test Methods*. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.

Künzel, H. M. (1995). *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components: One and two dimensional calculation using simple parameters*. IRB – Verlag, Stuttgart.

Künzel, H. M. (2005). Adapted vapour control for durable building enclosures. Em: *10DBMC International Conference On Durability of Building Materials and Components*, Lyon, 17 - 20 de Abril de 2005.

NF P10-202-3 / DTU 20.1. (1994). *Ouvrages en maçonnerie de petits éléments – parois et murs – partie 3: guide pour le choix des types de murs de façade en fonction du site*. CSTB: Centre Scientifique et Technique du Batiment.

Ramos, N. M., Delgado, J. Q., Barreira, E. e Freitas, V. P. (2009). Hygrothermal properties applied in numerical simulation: Interstitial condensation analysis. *Journal of Building Appraisal*, Vol. 5,2. pp 161-170

Santos, C. A. e Matias, L. (2006). *Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios*. LNEC, Lisboa.

Santos, C. P. (2007). Evolução das soluções de paredes face a novas exigências regulamentares. Lisboa . Em: Lourenço, P. B. *et al.* (ed.). *Seminário Paredes de Alvenaria - Inovação e Possibilidades*. Universidade do Minho, pp. 41-64.

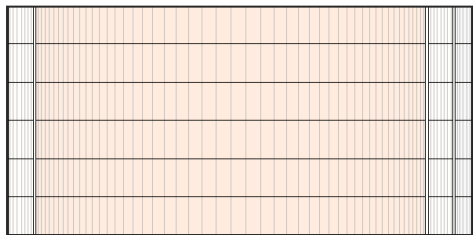
Vaz, M. (1995). *Estudo da Permeabilidade ao Vapor de Água em Materiais de Construção*. FEUP, Porto. Em: Faustino, J. (1997). *Análise de Soluções Constructivas Face à Difusão de Vapor*. Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Construção de Edifícios na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

wufi pro(1999) Introduction – PC-Program for calculating the coupled heat and moisture transfer in building components [online] [citação:05/01/2013] Disponível em: [www.wufi-pro.com](http://www.wufi-pro.com)

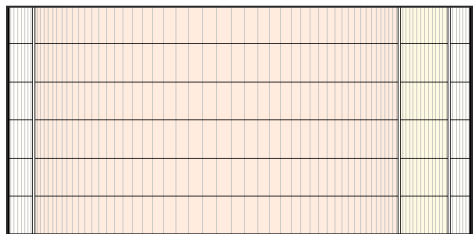
## ANEXOS

### Anexo A – Caracterização das Soluções Construtivas

Anexo A - Tabela 1 - Caracterização da solução construtiva PS1


Solução Construtiva PS1	
 <p>[1] [2] [1][3]</p>	<p>[1] – Reboco tradicional de argamassa de cimento e areia (1,5cm)</p> <p>[2] – Alvenaria de tijolo cerâmico furado (22cm)</p> <p>[3] – Estuque de gesso tradicional (1cm)</p>
Espessura [cm]	26
U [W/m <sup>2</sup> .K]	1,32

Anexo A - Tabela 2 - Caracterização da solução construtiva PS2

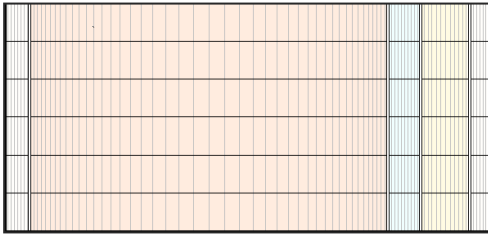
Solução Construtiva PS2	
 <p>[1] [2] [3] [4]</p>	<p>[1] – Reboco tradicional de argamassa de cimento e areia (1,5cm)</p> <p>[2] – Alvenaria de tijolo cerâmico furado (22cm)</p> <p>[3] – Poliestireno expandido (3cm)</p> <p>[4] – Placa de gesso cartonado (1,25cm)</p>
Espessura [cm]	28
U [W/m <sup>2</sup> .K]	0,63

**Análise Comparativa de Diferentes Modelos de Simulação Numérica na  
Avaliação da Ocorrência de Condensações Internas**

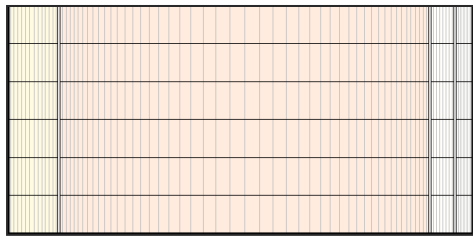
**Anexo A - Tabela 3 - Caracterização da solução construtiva PS2a**

<b>Solução Construtiva PS2a</b>	
 <p>[1] [2] [3][4][5]</p>	<p>[1] – Reboco tradicional de argamassa de cimento e areia (1,5cm)</p> <p>[2] – Alvenaria de tijolo cerâmico furado (22cm)</p> <p>[3] – Poliestireno expandido (3cm)</p> <p>[4] – Barreira pára-vapor (<math>s_d=1500m</math>) (0,1cm)</p> <p>[5] – Placa de gesso cartonado (1,25cm)</p>
Espessura [cm]	28
U [W/m <sup>2</sup> .K]	0,63

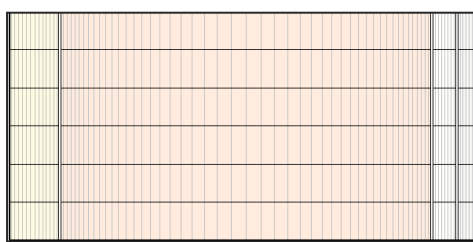
**Anexo A - Tabela 4 - Caracterização da solução construtiva PS3**

<b>Solução Construtiva PS3</b>	
 <p>[1] [2] [3] [4] [5]</p>	<p>[1] – Reboco tradicional de argamassa de cimento e areia (1,5cm)</p> <p>[2] – Alvenaria de tijolo cerâmico furado (22cm)</p> <p>[3] – Lâmina de ar (2cm)</p> <p>[4] – Poliestireno expandido (3cm)</p> <p>[5] – Placa de gesso cartonado (1,25cm)</p>
Espessura [cm]	30
U [W/m <sup>2</sup> .K]	0,58

Anexo A - Tabela 5 - Caracterização da solução construtiva PS4

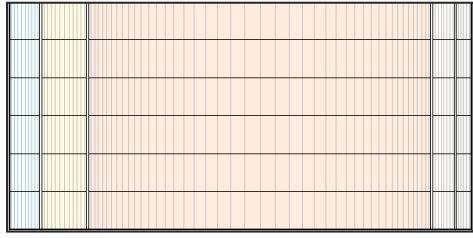
Solução Construtiva PS4	
 <p>[1] [2] [3][4]</p>	<p><math>S_d=0,2m</math> Mineral Stucco (without driving rain)</p> <p>[1] – Poliestireno expandido (3cm)</p> <p>[2] – Alvenaria de tijolo cerâmico furado (22cm)</p> <p>[3] – Reboco tradicional de argamassa de cimento e areia (1,5cm)</p> <p>[4] – Estuque de gesso tradicional (1cm)</p>
Espessura [cm]	32
$U$ [W/m <sup>2</sup> .K]	0,64

Anexo A - Tabela 6 - Caracterização da solução construtiva PS5

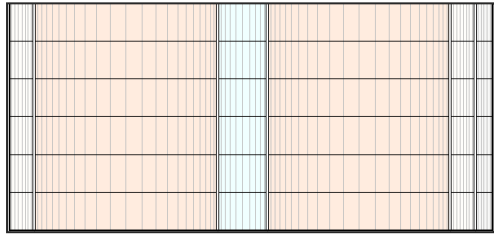
Solução Construtiva PS5	
 <p>[1] [2] [3][4]</p>	<p>[1] – Espuma rígida de poliuretano (3cm)</p> <p>[2] – Alvenaria de tijolo cerâmico furado (22cm)</p> <p>[3] – Reboco tradicional de argamassa de cimento e areia (1,5cm)</p> <p>[4] – Estuque de gesso tradicional (1cm)</p>
Espessura [cm]	32
$U$ [W/m <sup>2</sup> .K]	0,64

**Análise Comparativa de Diferentes Modelos de Simulação Numérica na  
Avaliação da Ocorrência de Condensações Internas**

**Anexo A - Tabela 7 - Caracterização da solução construtiva PS6**

<b>Solução Construtiva PS6</b>	
 <p>[1] [2] [3] [4][5]</p>	<p>[1] – Revestimento independente do suporte de tonalidade branca e lâmina de ar ventilada (2cm)</p> <p>[2] – Poliestireno expandido (3cm)</p> <p>[3] – Alvenaria de tijolo cerâmico furado (22cm)</p> <p>[4] – Reboco tradicional de argamassa de cimento e areia (1,5cm)</p> <p>[5] - Estuque de gesso tradicional (1cm)</p>
<p align="center">Espessura [cm]</p>	<p>30</p>
<p align="center">U [W/m2.K]</p>	<p>0,61</p>

**Anexo A - Tabela 8 - Caracterização da solução construtiva PD1**

<b>Solução Construtiva PD1</b>	
 <p>[1] [2] [3] [2] [4][5]</p>	<p>[1] – Reboco tradicional de argamassa de cimento e areia (1,5cm)</p> <p>[2] – Alvenaria de tijolo cerâmico furado (11cm)</p> <p>[3] – Lâmina de ar (3cm)</p> <p>[4] – Reboco tradicional de argamassa de cimento e areia (1,5cm)</p> <p>[5] - Estuque de gesso tradicional (1cm)</p>
<p align="center">Espessura [cm]</p>	<p>29</p>
<p align="center">U [W/m2.K]</p>	<p>1,07</p>

Anexo A - Tabela 9 - Caracterização da solução construtiva PD2

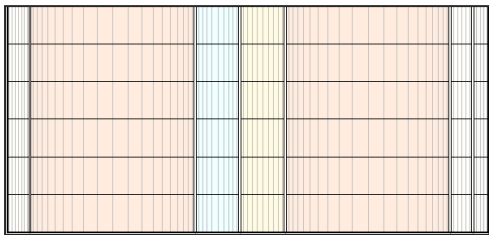
Solução Construtiva PD2	
<p>[1] [2] [3] [2] [4][5]</p>	<p>[1] – Reboco tradicional de argamassa de cimento e areia (1,5cm)</p> <p>[2] – Alvenaria de tijolo cerâmico furado (11cm)</p> <p>[3] – Poliestireno expandido (3cm)</p> <p>[4] – Reboco tradicional de argamassa de cimento e areia (1,5cm)</p> <p>[5] - Estuque de gesso tradicional (1cm)</p>
Espessura [cm]	29
U [W/m <sup>2</sup> .K]	0,63

Anexo A - Tabela 10 - Caracterização da solução construtiva PD2a

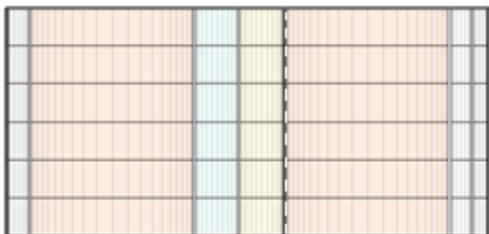
Solução Construtiva PD2a	
<p>[1] [2] [3] [4] [2] [5][6]</p>	<p>[1] – Reboco tradicional de argamassa de cimento e areia (1,5cm)</p> <p>[2] – Alvenaria de tijolo cerâmico furado (11cm)</p> <p>[3] – Poliestireno expandido (3cm)</p> <p>[4] - Barreira pára-vapor (<math>s_d=1500m</math>) (0,1cm)</p> <p>[5] – Reboco tradicional de argamassa de cimento e areia (1,5cm)</p> <p>[6] - Estuque de gesso tradicional (1cm)</p>
Espessura [cm]	29
U [W/m <sup>2</sup> .K]	0,63

**Análise Comparativa de Diferentes Modelos de Simulação Numérica na  
Avaliação da Ocorrência de Condensações Internas**

**Anexo A - Tabela 11 - Caracterização da solução construtiva PD3**

<b>Solução Construtiva PD3</b>	
 <p>[1] [2] [3] [4] [2] [5][6]</p>	<p>[1] – Reboco tradicional de argamassa de cimento e areia (1,5cm)</p> <p>[2] – Alvenaria de tijolo cerâmico furado (11cm)</p> <p>[3] – Lâmina de ar (3cm)</p> <p>[4] – Poliestireno expandido (3cm)</p> <p>[5] – Reboco tradicional de argamassa de cimento e areia (1,5cm)</p> <p>[6] – Estuque de gesso tradicional (1cm)</p>
Espessura [cm]	32
U [W/m <sup>2</sup> .K]	0,57

**Anexo A – Tabela 12 - Caracterização da solução construtiva PD3a**

<b>Solução Construtiva PD3a</b>	
 <p>[1] [2] [3] [4] [5] [2] [6][7]</p>	<p>[1] – Reboco tradicional de argamassa de cimento e areia (1,5cm)</p> <p>[2] – Alvenaria de tijolo cerâmico furado (11cm)</p> <p>[3] – Lâmina de ar (3cm)</p> <p>[4] – Poliestireno expandido (3cm)</p> <p>[5] - Barreira pára-vapor (<math>s_d=1500m</math>) (0,1cm)</p> <p>[6] – Reboco tradicional de argamassa de cimento e areia (1,5cm)</p> <p>[7] – Estuque de gesso tradicional (1cm)</p>
Espessura [cm]	32
U [W/m <sup>2</sup> .K]	0,57



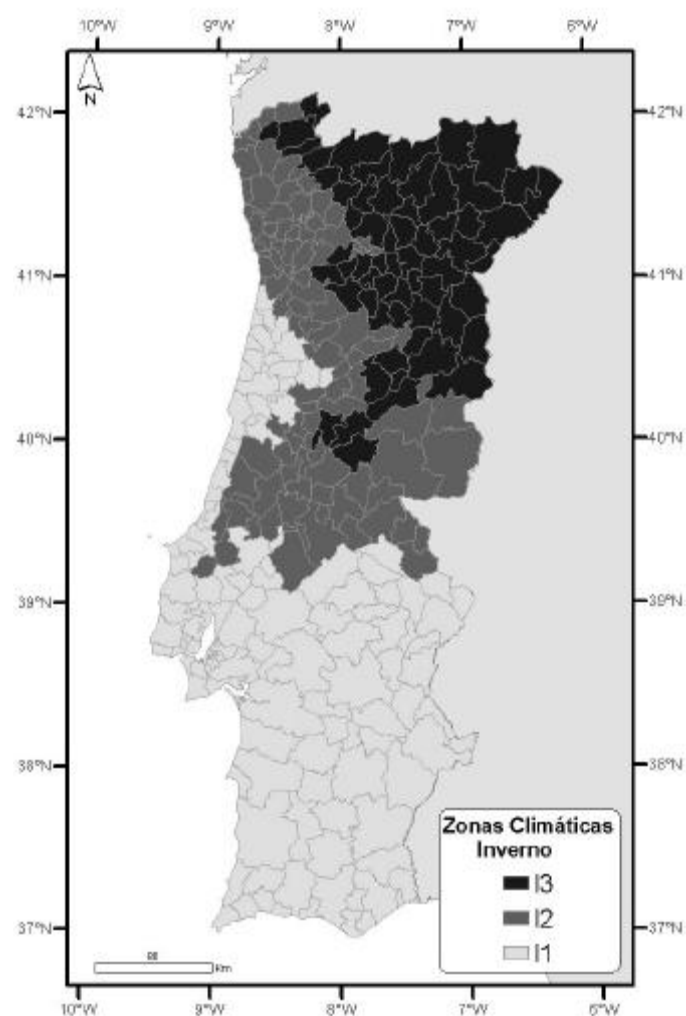
**Anexo A - Tabela 13 - Verificação das recomendações CSTB pelas soluções construtivas simuladas**

Soluções	Regras de Concepção		
	1	2	3.1
PS1	-	-	-
PS2	verifica	não verifica	verifica
PS2a	verifica	verifica	verifica
PS3	verifica	não verifica	verifica
PD1	-	-	-
PD2	não verifica	verifica	não verifica
PD2a	não verifica	verifica	não verifica
PD3	verifica	verifica	não verifica
PD3a	verifica	verifica	não verifica

**Anexo A - Tabela 14 - Verificação dos valores de referência do coeficiente de transmissão térmica, U, para cada zona climática de Inverno, em Portugal.**

Regra	U[W/m <sup>2</sup> .°C]	I1	I2	I3
PS1	1,32	Não verifica	Não verifica	Não verifica
PS2	0,63	Verifica	Não verifica	Não verifica
PS2a	0,63	Verifica	Não verifica	Não verifica
PS3	0,58	Verifica	Verifica	Não verifica
PS4	0,64	Verifica	Não verifica	Não verifica
PS5	0,64	Verifica	Não verifica	Não verifica
PS6	0,59	Verifica	Verifica	Não verifica
PD1	1,07	Não verifica	Não verifica	Não verifica
PD2	0,63	Verifica	Não verifica	Não verifica
PD2a	0,63	Verifica	Não verifica	Não verifica
PD3	0,57	Verifica	Verifica	Não verifica
PD3a	0,57	Verifica	Verifica	Não verifica

**Análise Comparativa de Diferentes Modelos de Simulação Numérica na  
Avaliação da Ocorrência de Condensações Internas**



**Anexo A – Figura 1 - Portugal Continental. Zonas climáticas de Inverno  
(Fonte: Decreto-Lei n.º 80/2006)**

**Anexo B** – Propriedades dos Materiais**Anexo B – Tabela 15 – Parâmetros dos materiais utilizados nas simulações higrotérmicas.**

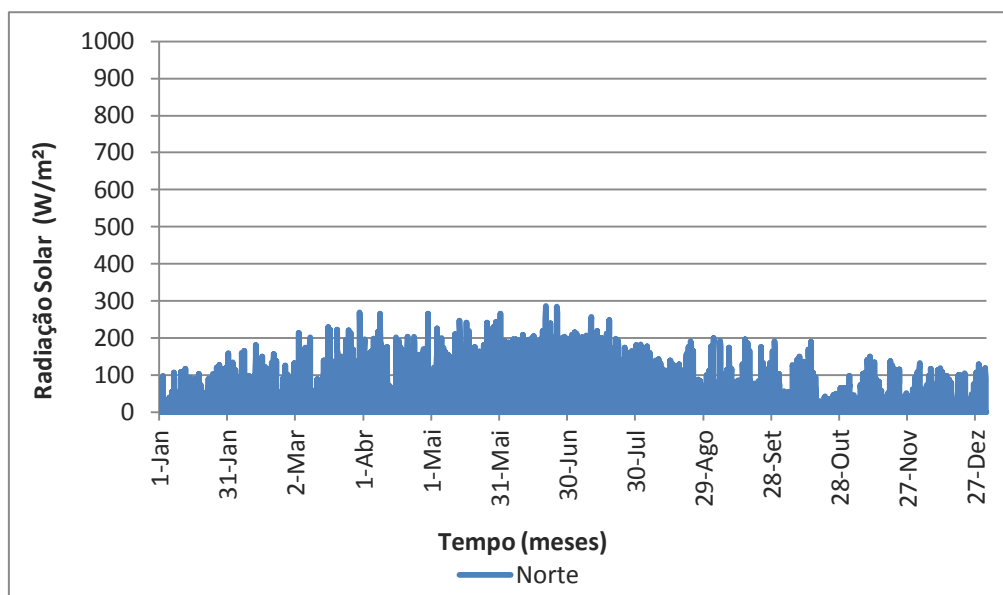
Camada	Material	Espessura [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Porosidade [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	Cp [J/kg.K]	$\mu$ [-]	$\lambda$ [W/m.°C]	Referência
Revestimento Exterior	Reboco tradicional	0,015	1800	0,3	1000	10*	1,3**	* (BS, 2000) ** (Santos, et al., 2006)
Pano de Alvenaria	Tijolo Cerâmico Furado	0,11	620 <sup>(3)</sup>	0,74	850	22*	0,41**	* (VAZ, 1995), ** calculado a partir dos valores de Rt em (Santos, et al., 2006)
		0,15	630 <sup>(3)</sup>			20*	0,38**	
		0,22	633 <sup>(3)</sup>			18 <sup>*(1)</sup>	0,42**	
Caixa de ar	Ar	0,02	1,3	0,999	1000	0,56	0,13	Base de Dados WUFI
		0,03				0,46	0,18	
Isolamento Térmico	Poliestireno Expandido Extrudido (XPS)	0,03	40	0,95	1450*	150*	0,037**	* (BS, 2000) ** (Santos, et al., 2006)
	Poliestireno Expandido (EPS)	0,03	30	0,95	1450*	60*	0,037**	
	Lã Mineral (MW)	0,03	60	0,95	1030*	1*	0,04	* (BS, 2000)
	Poliuretano (PUR)	0,03	40	0,95	1400*	60*	0,04**	
Revestimento Interior	Placa de Gesso Cartonado	0,0125	900*	0,65	1000*	10*	0,25**	
	Estuque de Gesso	0,01	1000	0,305		10 <sup>(4)</sup>	0,4**	

(1) o valor do factor de resistência à difusão de vapor foi aproximado a uma alvenaria de 20cm de espessura.

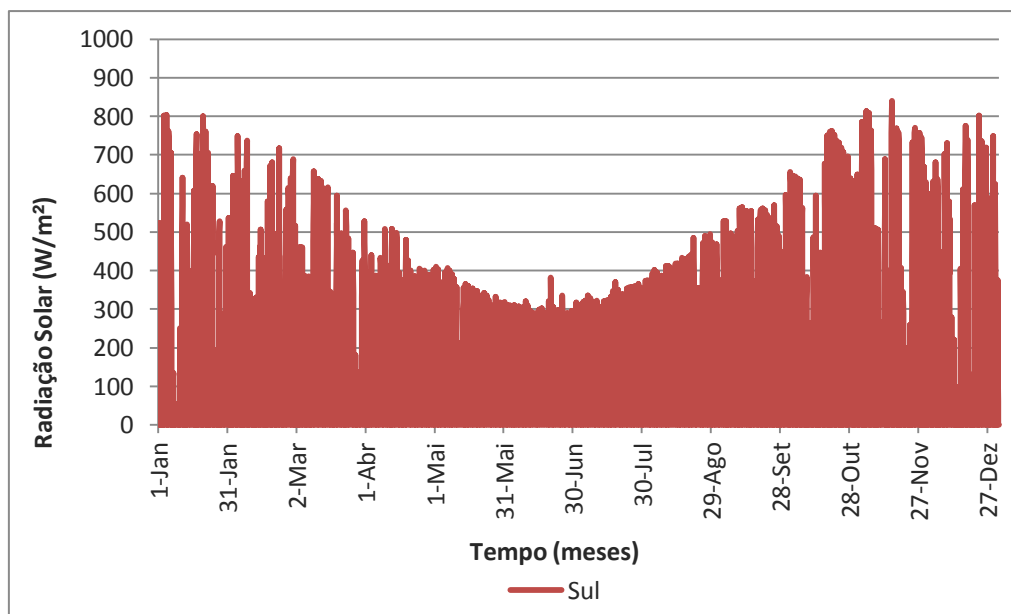
(3) valores retirados de ficha técnica PRECERAM – indústrias de construção

(4) factor de resistência à difusão de vapor de água dependente do teor de humidade

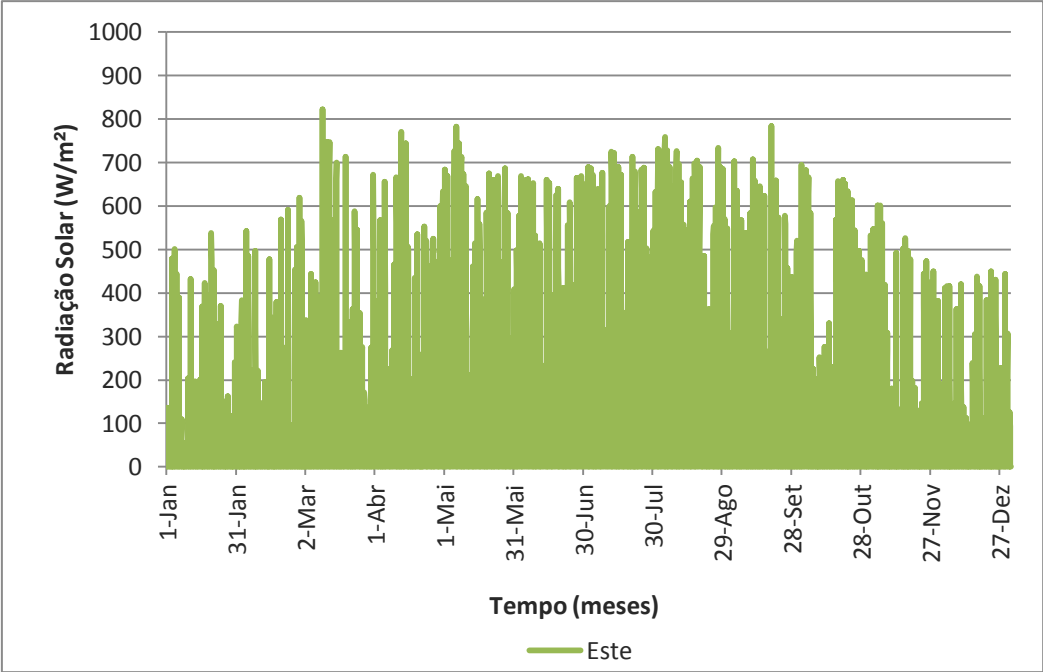
## Anexo C – Análise de Parâmetros Superficiais



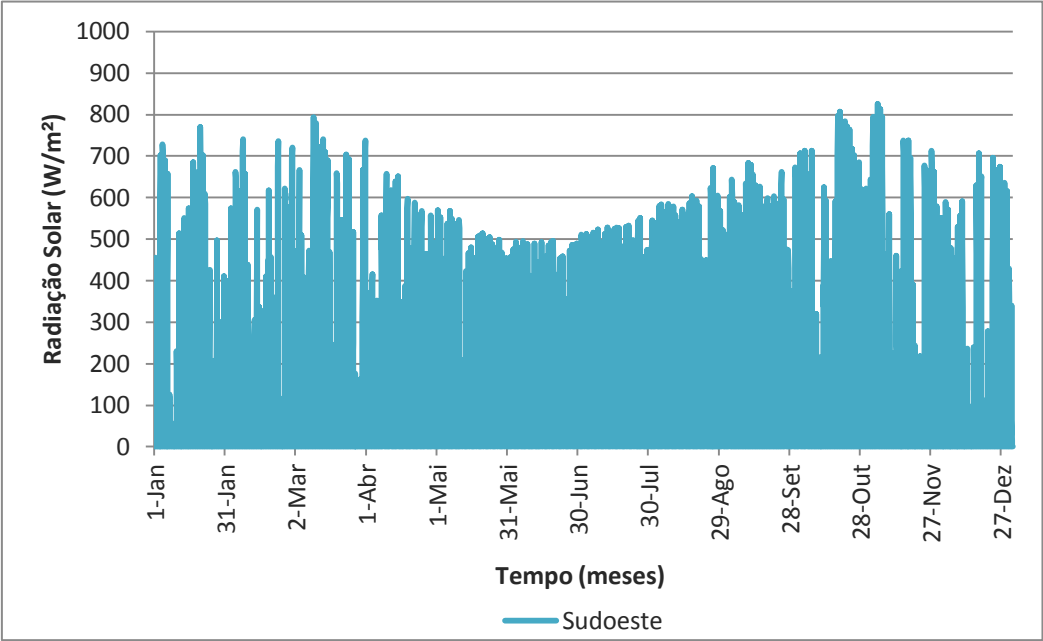
Anexo C – Figura 2 – Radiação solar para a direcção Norte



Anexo C - Figura 3 – Radiação solar para a direcção Sul

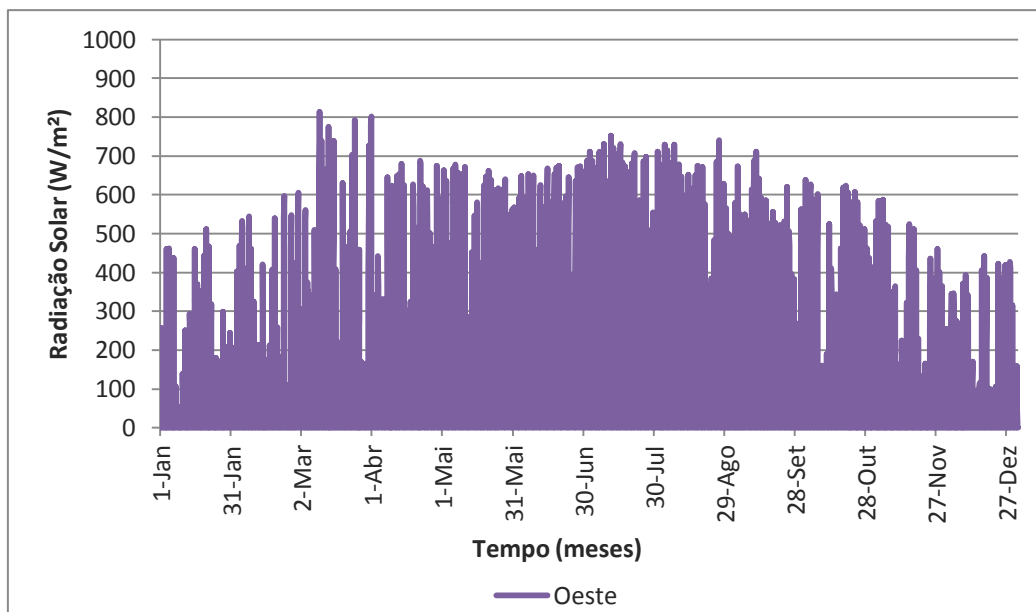


Anexo C – Figura 4 – Radiação solar para a direcção Este

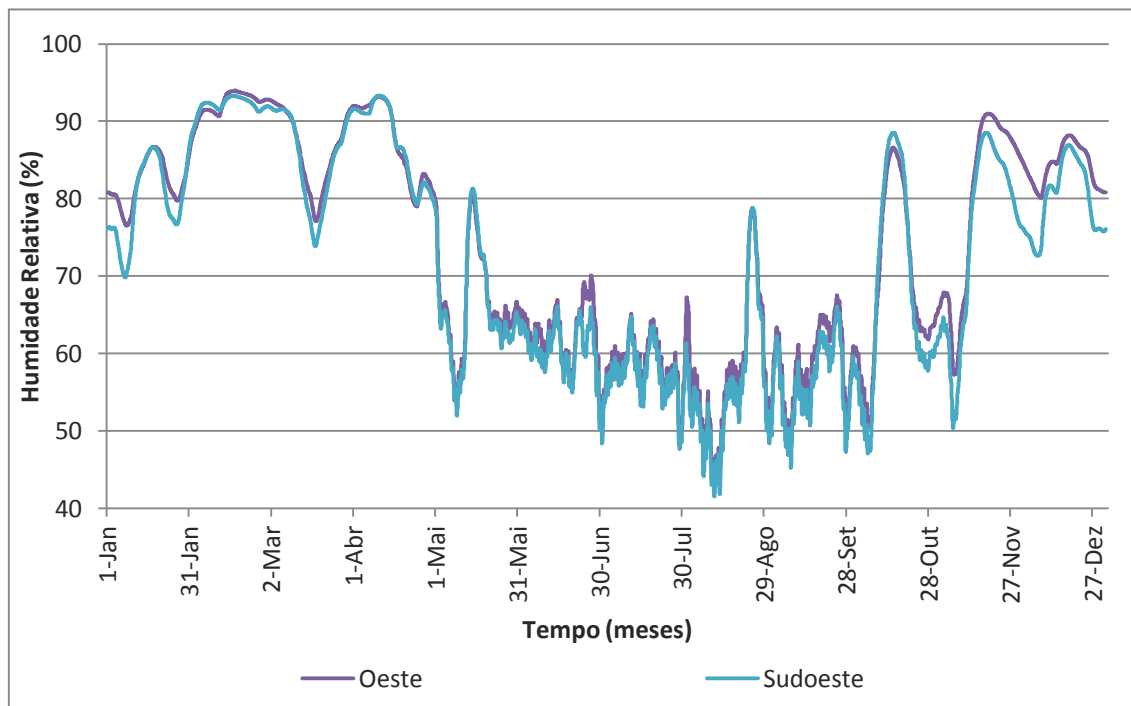


Anexo C – Figura 5 – Radiação solar para a direcção Sudoeste

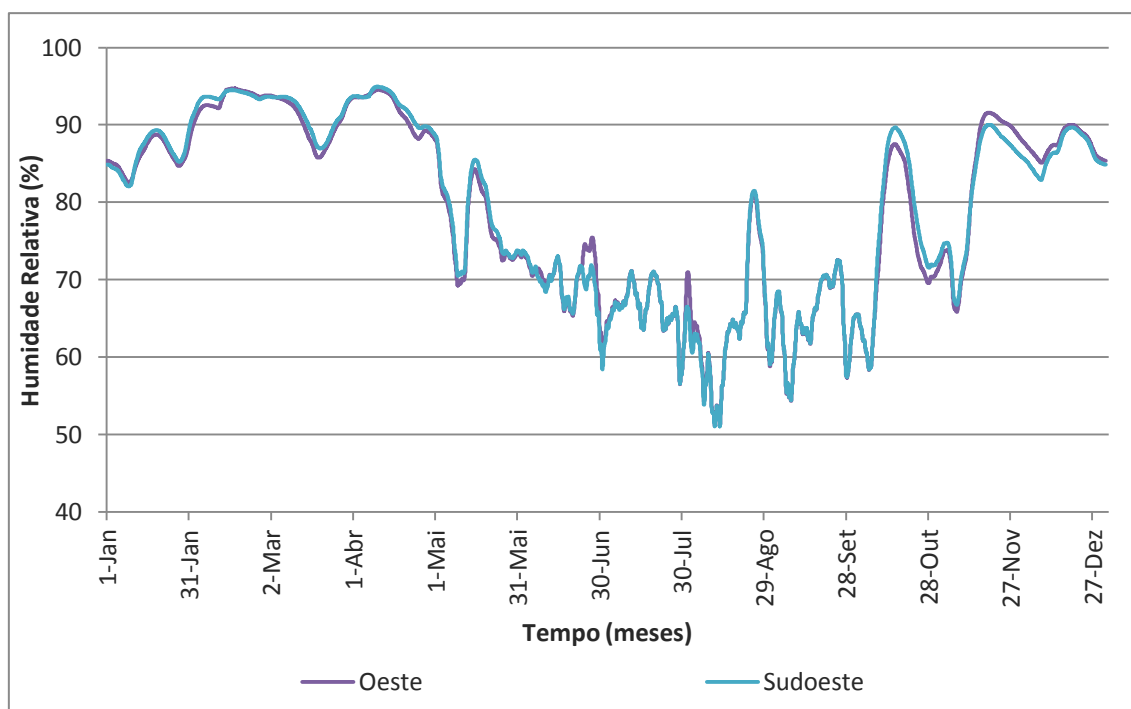
**Análise Comparativa de Diferentes Modelos de Simulação Numérica na Avaliação da Ocorrência de Condensações Internas**



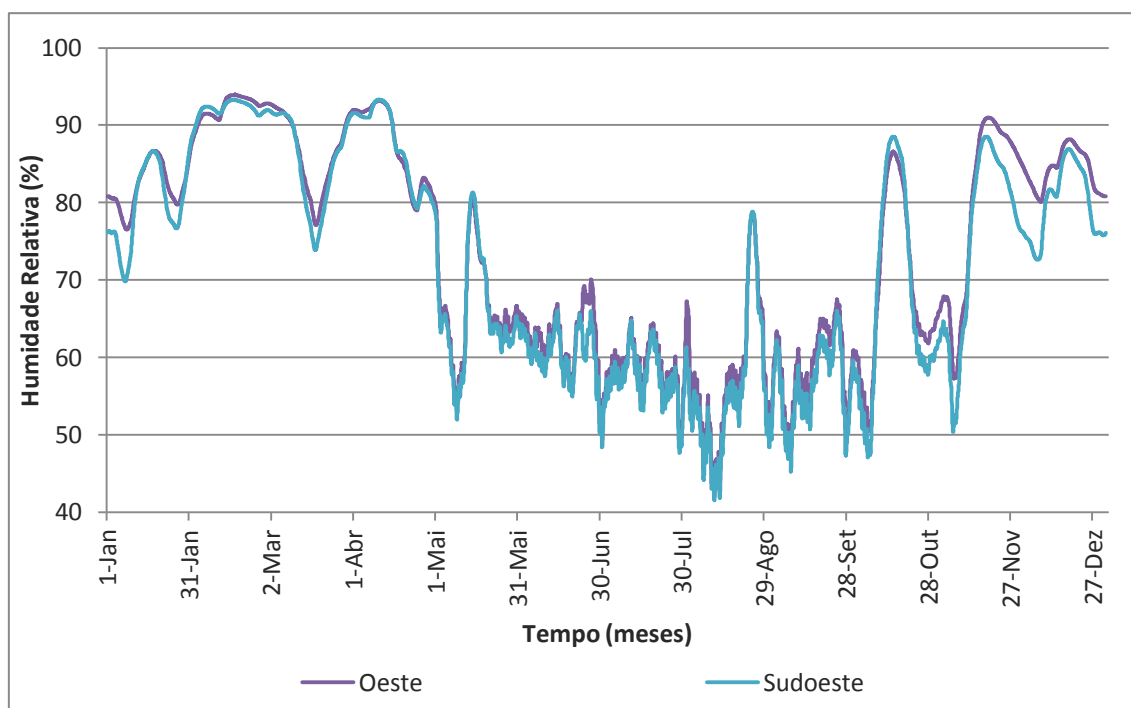
**Anexo C - Figura 6 – Radiação solar para a direcção Oeste**



**Anexo C - Figura 7 – Humidade relativa na face interior do reboco exterior com todos os parâmetros activos**

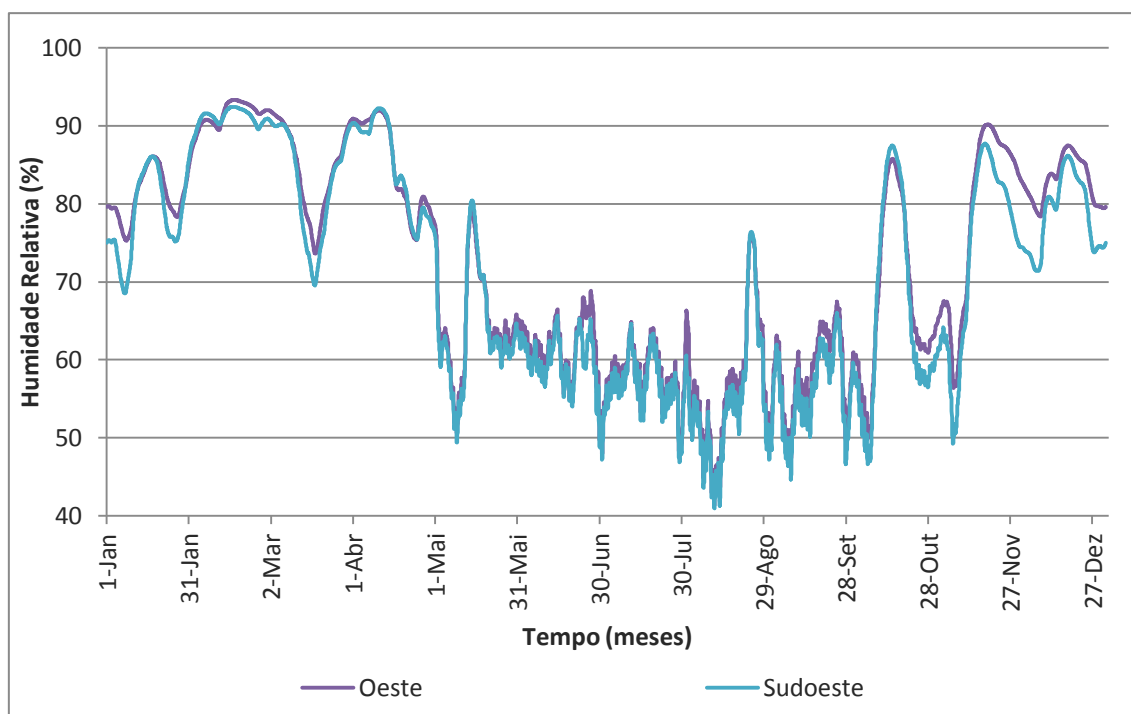


Anexo C - Figura 8 – Humidade relativa na face interior do reboco exterior com o coeficiente de absorção de radiação solar  $\alpha_s$  nulo

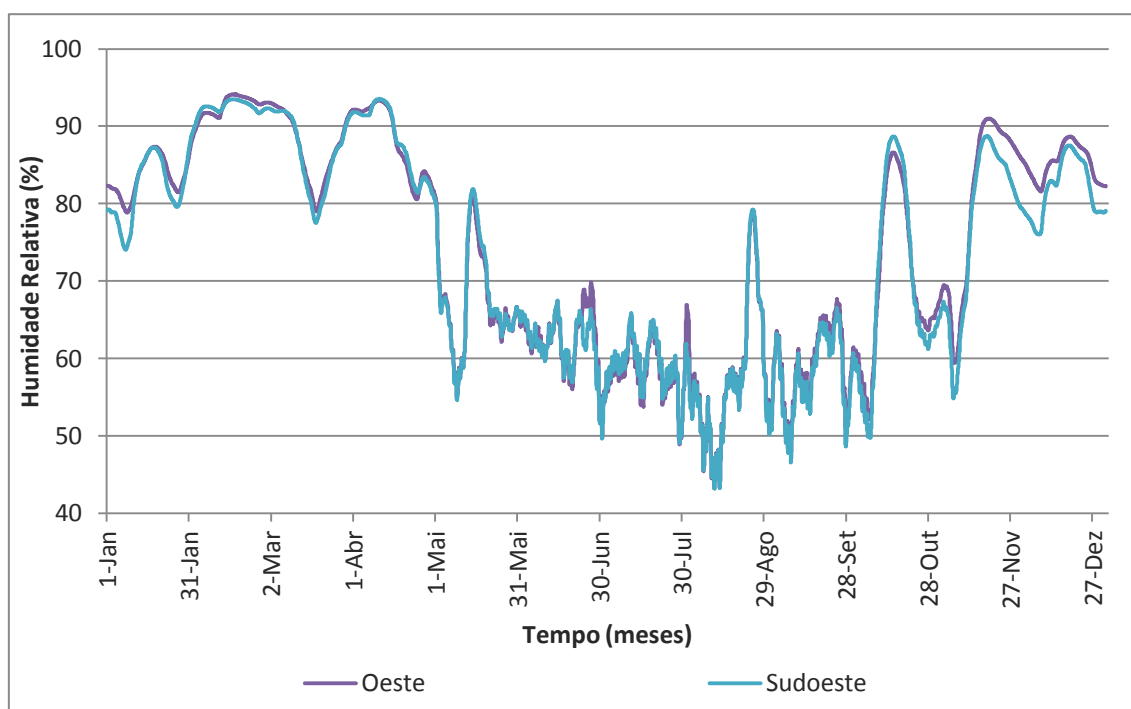


Anexo C - Figura 9 – Humidade relativa na face interior do reboco exterior com a emissividade  $\epsilon$  nula

**Análise Comparativa de Diferentes Modelos de Simulação Numérica na  
Avaliação da Ocorrência de Condensações Internas**

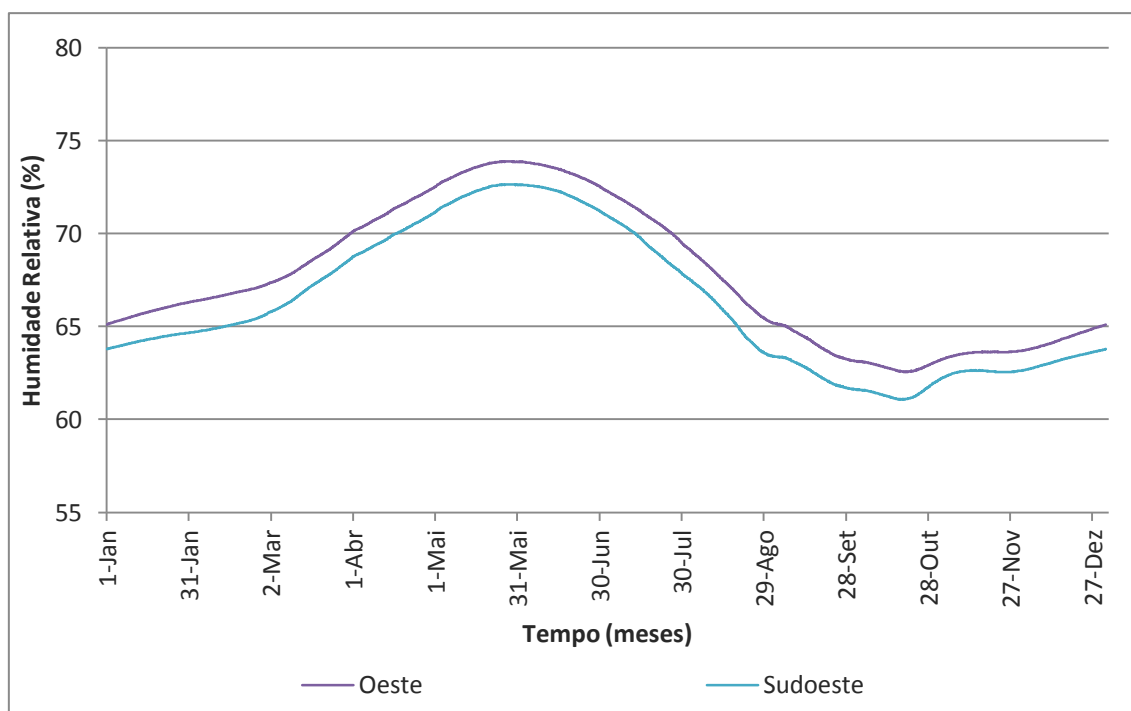


**Anexo C - Figura 10 – Humidade relativa na face interior do reboco exterior com o cálculo de calor latente de evaporação/condensação desactivado**

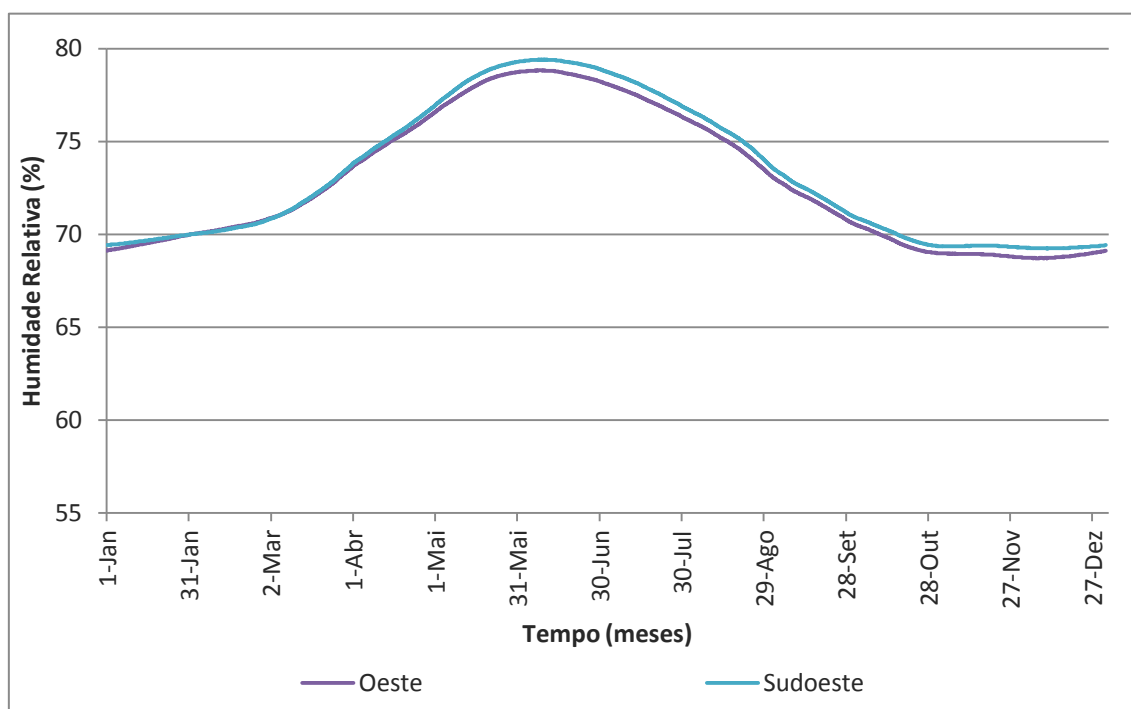


**Anexo C - Figura 11 – Humidade relativa na face interior do reboco exterior com o valor de resistência térmica superficial exterior constante ( $R_{se}=0,0588m^2C/W$ )**



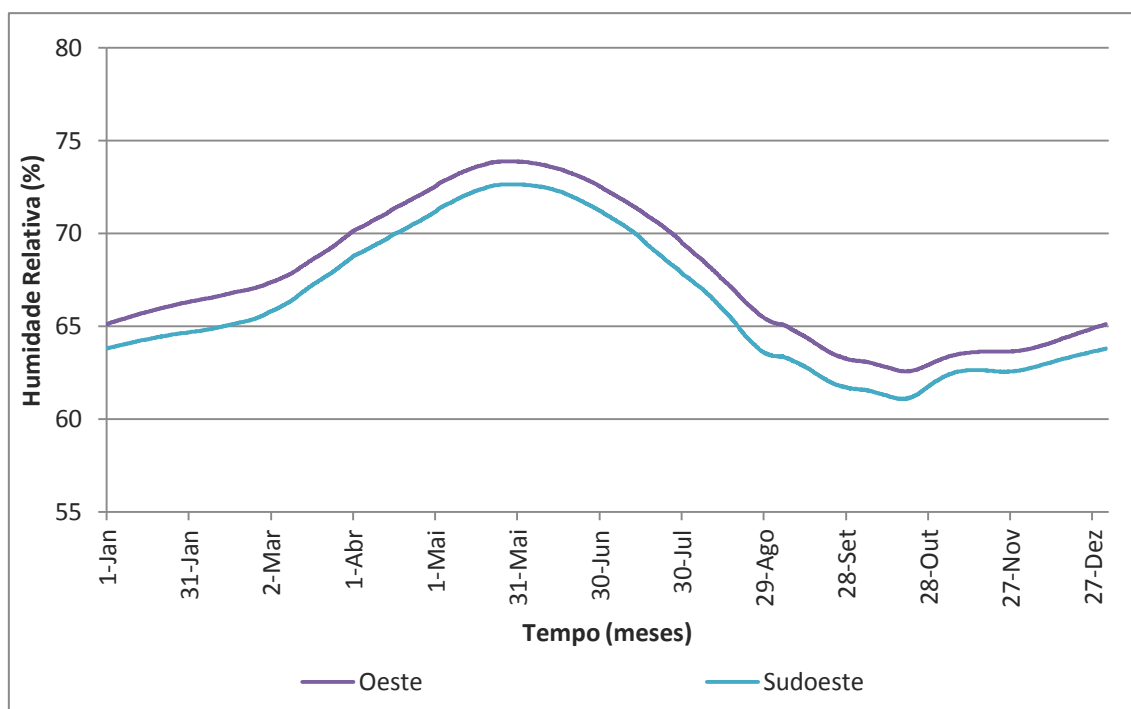


Anexo C - Figura 12 - Humidade relativa no centro do pano de alvenaria com todos os parâmetros activos

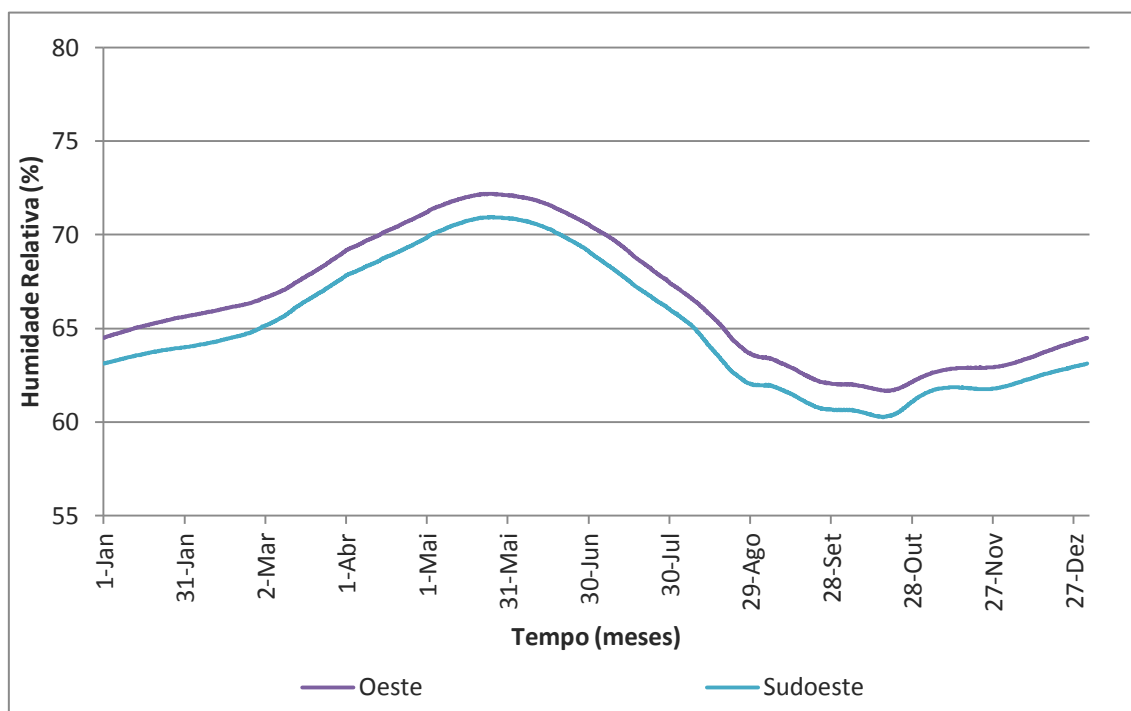


Anexo C - Figura 13 - Humidade relativa no centro do pano de alvenaria com o coeficiente de absorção de radiação solar  $\alpha_s$  nulo

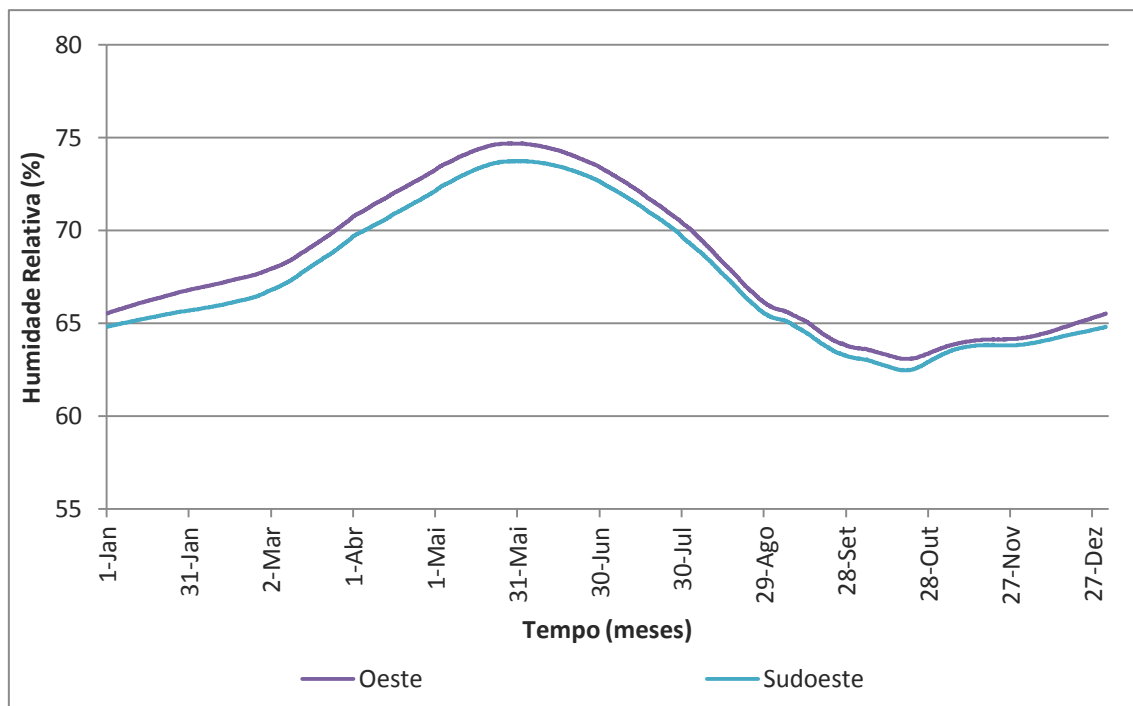
**Análise Comparativa de Diferentes Modelos de Simulação Numérica na  
Avaliação da Ocorrência de Condensações Internas**



**Anexo C - Figura 14 - Humidade relativa no centro do pano de alvenaria com a emissividade  $\epsilon$  nula**



**Anexo C - Figura 15 - Humidade relativa no centro do pano de alvenaria com o cálculo de calor latente de evaporação/condensação desactivado**



Anexo C - Figura 16 - Humidade relativa na face interior do reboco exterior com o valor de condutância térmica superficial constante ( $h_{ext}=0,0588m^2C/W$ )

**Anexo D** – Dados Inseridos nas Simulações Higrotérmicas

**Anexo D - Tabela 16 – Dados das simulações realizadas no sub-capítulo 3.2.1**

Assembly/Monitor Positions	Orientation	Norte/Sul/Este/Oeste/Sudoeste		
	Inclination	90º		
	Building Height/Driving Rain Coeficients	Tall Building, upper part more than 20m R1=0;R2=0,2s/m		
Surface Transfer Coefficients	Exterior Surface	Heat Resistance[m <sup>2</sup> .K/W]		wind-dependent Rse=0,0588
		Sd-value [m]		No coating (-)
		Short-Wave Radiation Absorptivity [-]		Stucco,white(new) (0,2)
		Long-Wave Radiation Emissivity		0,9
		Rain Water Absorption Factor [-]		According to inclination and construction type (0,7)
	Interior Surface	Heat Resistance[m2.K/W]		0,125
		Sd-value [m]		No coating (-)
Initial Conditions	Initial Moisture in Component [-]	Constant Across Component		0,80
	Initial Temperature in Component [°C]			20°C
Control	Calculation Period/Profiles	1/06/2012 – 01/01/2016		
	Numerics	Mode of calculation	Heat transport	Sim
			Calculation	Sim
		Hygrothermal Special Options	Excluding Capillary Conduction	Não
			Excluding Latent Heat of Evaporation	Não
			Excluding Latent Heat of Fusion	Não
		Numerical Parameters	Increased Accuracy	Sim
			Adapted Convergence	Sim
		Adaptive Time Step Control	Não	
	Climate	Outdoor (Left Side)	Lisbon – Longitude=9,13°West, Latitude=38,77°North, Altitude=110m	
Indoor (Right Side)		EN15026 - Normal Moisture Load		

**Anexo D - Tabela 17 – Dados das simulações realizadas no sub-capítulo 3.2.2**

Assembly/Monitor Positions	Orientation	Oeste		
	Inclination	90°		
	Building Height/Driving Rain Coefficients	Tall Building, upper part more than 20m R1=0;R2=0,2s/m		
Surface Transfer Coefficients	Exterior Surface	Heat Resistance[m <sup>2</sup> .K/W]		wind-dependent Rse=0,0588
		Sd-value [m]		No coating (-)
		Short-Wave Radiation Absorptivity [-]		Stucco white/bright/dark 0,2/0,4/0,6
		Long-Wave Radiation Emissivity		0,9
		Rain Water Absorption Factor [-]		According to inclination and construction type (0,7)
	Interior Surface	Heat Resistance[m2.K/W]		0,125
		Sd-value [m]		No coating (-)
Initial Conditions	Initial Moisture in Component [-]	Constant Across Component		0,80
	Initial Temperature in Component [°C]			20°C
Control	Calculation Period/Profiles	1/06/2012 – 01/01/2016		
	Numerics	Mode of calculation	Heat transport	Sim
			Moisture Transport	Sim
		Hygrothermal Special Options	Excluding Capillary Conduction	Não
			Excluding Latent Heat of Evaporation	Não
			Excluding Latent Heat of Fusion	Não
		Numerical Parameters	Increased Accuracy	Sim
			Adapted Convergence	Sim
		Adaptive Time Step Control	Não	
Climate	Outdoor (Left Side)	Lisbon – Longitude=9,13°West, Latitude=38,77°North, Altitude=110m		
	Indoor (Right Side)	EN15026 - Normal Moisture Load		

**Análise Comparativa de Diferentes Modelos de Simulação Numérica na  
Avaliação da Ocorrência de Condensações Internas**

**Anexo D - Tabela 18 – Dados das simulações realizadas no sub-capítulo 3.2.3**

Assembly/Monitor Positions	Orientation	Oeste		
	Inclination	90°		
	Building Height/Driving Rain Coefficients	Tall Building, upper part more than 20m R1=0;R2=0,2s/m		
Surface Transfer Coefficients	Exterior Surface	Heat Resistance[m <sup>2</sup> .K/W]		wind-dependent Rse=0,0588
		Sd-value [m]		No coating (-)
		Short-Wave Radiation Absorptivity [-]		Stucco,white(new) (0,2)
		Long-Wave Radiation Emissivity		0,9
		Rain Water Absorption Factor [-]		According to inclination and construction type (0,7)
	Interior Surface	Heat Resistance[m2.K/W]		0,125
		Sd-value [m]		No coating (-)
Initial Conditions	Initial Moisture in Component [-]	Constant Across Component		0,80
	Initial Temperature in Component [°C]			20°C
Control	Calculation Period/Profiles	1/06/2012 – 01/01/2016		
	Numerics	Mode of calculation	Heat Transport	Sim
			Moisture Transport	Sim
		Hygrothermal Special Options	Excluding Capillary Conduction	Não
			Excluding Latent Heat of Evaporation	Não
			Excluding Latent Heat of Fusion	Não
		Numerical Parameters	Increased Accuracy	Sim
			Adapted Convergence	Sim
		Adaptive Time Step Control	Não	
Climate	Outdoor (Left Side)	Lisbon – Longitude=9,13°West, Latitude=38,77°North, Altitude=110m		
	Indoor (Right Side)	EN15026 - Normal Moisture Load		

**Anexo D - Tabela 19 – Dados das simulações realizadas no sub-capítulo 3.2.4**

Assembly/Monitor Positions	Orientation	Oeste			
	Inclination	90º			
	Building Height/Driving Rain Coefficients	Tall Building, upper part more than 20m R1=0;R2=0s/m			
Surface Transfer Coefficients	Exterior Surface	Heat Resistance[m².K/W]	wind-dependent Rse=0,0588		
		Sd-value [m]	No coating (-)		
		Short-Wave Radiation Absorptivity [-]	Stucco,white(new) (0,2)		
		Long-Wave Radiation Emissivity	0,9		
		Rain Water Absorption Factor [-]	No absorption		
	Interior Surface	Heat Resistance[m².K/W]	0,125		
		Sd-value [m]	No coating (-)		
Initial Conditions	Initial Moisture in Component [-]	Constant Across Component	0,80		
	Initial Temperature in Component [°C]		20°C		
Control	Calculation Period/Profiles	01/06/2012 – 01/01/2016			
	Numerics	Mode of calculation	Heat transport	Sim	
			Moisture Transport	Sim	
		Hygrothermal Special Options	Excluding Capillary Conduction	Não	
			Excluding Latent Heat of Evaporation	Não	
			Excluding Latent Heat of Fusion	Não	
		Numerical Parameters	Increased Accuracy	Sim	
			Adapted Convergence	Sim	
		Adaptive Time Step Control	Não		
	Climate	Outdoor (Left Side)	Lisbon – Longitude=9,13°West, Latitude=38,77°North, Altitude=110m		
Indoor (Right Side)		EN13788 Nível 3 e 4; EN15026 Nível Normal e Moderado			

**Análise Comparativa de Diferentes Modelos de Simulação Numérica na  
Avaliação da Ocorrência de Condensações Internas**

**Anexo D - Tabela 20 – Dados das simulações realizadas no sub-capítulo 3.3**

Assembly/Monitor Positions	Orientation	Oeste		
	Inclination	90°		
	Building Height/Driving Rain Coeficients	Tall Building, upper part more than 20m R1=0;R2=0,2s/m		
Surface Transfer Coefficients	Exterior Surface	Heat Resistance[m <sup>2</sup> .KW]		wind-dependent Rse=0,0588
		Sd-value [m]		No coating (-) PS4 – stucco, min. (Sd=0,2m) PS5 – metal foil (Sd=10000m)
		Short-Wave Radiation Absorptivity [-]		Stucco white 0,2
		Long-Wave Radiation Emissivity		0,9
		Rain Water Absorption Factor [-]		According to inclination and construction type (0,7)
	Interior Surface	Heat Resistance[m2.KW]		0,125
		Sd-value [m]		No coating (-)
Initial Conditions	Initial Moisture in Component [-]	Constant Across Component		0,80
	Initial Temperature in Component [°C]			20°C
Control	Calculation Period/Profiles	01/06/2012 – 01/01/2016		
	Numerics	Mode of calculation	Heat transport	Sim
			Moisture Transport	Sim
		Hygrothermal Special Options	Excluding Capillary Conduction	Não
			Excluding Latent Heat of Evaporation	Não
			Excluding Latent Heat of Fusion	Não
		Numerical Parameters	Increased Accuracy	Sim
			Adapted Convergence	Sim
		Adaptive Time Step Control	Não	
Climate	Outdoor (Left Side)	Lisbon – Longitude=9,13°West, Latitude=38,77°North, Altitude=110m		
	Indoor (Right Side)	EN13788 Nível 4; T=18°C		



## Anexo E – Comparação entre o WUFI e o Método de Glaser

Anexo E - Tabela 21 – Comparação entre a simulação numérica do WUFI sem pluviosidade incidente e o método de Glaser com valor médio diário das condições externas de temperatura e humidade relativa, para o dia 21 de Fevereiro.

Solução	Face int. reb. ext.	Face int. pano ext.	Face ext. I.T.	Face int. I.T.
PS2	WUFI c/ pluviosidade $\Delta P_{min}=45Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=-174Pa$ CONDENSAÇÃO SEGUNDO GLASER		GLASER $\Delta P_{min}=184Pa$
PS2a	WUFI c/ pluviosidade $\Delta P_{min}=45Pa$	WUFI c/ pluviosidade $\Delta P_{min}=244Pa$		WUFI c/ pluviosidade $\Delta P_{min}=863Pa$
PS3	WUFI c/ pluviosidade $\Delta P_{min}=45Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=-202Pa$ CONDENSAÇÃO SEGUNDO GLASER	GLASER $\Delta P_{min}=-116Pa$ CONDENSAÇÃO SEGUNDO GLASER	GLASER $\Delta P_{min}=206Pa$
PD2	WUFI c/ pluviosidade $\Delta P_{min}=45Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=-58Pa$ CONDENSAÇÃO SEGUNDO GLASER		GLASER $\Delta P_{min}=269Pa$
PD2a	WUFI c/ pluviosidade $\Delta P_{min}=45Pa$	GLASER Entre 0h e 6h Entre 16h e 23h $\Delta P_{min}=247Pa$		GLASER $\Delta P_{min}=786Pa$
		WUFI c/ pluviosidade Entre 7h e 15h $\Delta P_{min}=221Pa$		
PD3	WUFI c/ pluviosidade $\Delta P_{min}=45Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=-73Pa$ CONDENSAÇÃO SEGUNDO GLASER	GLASER $\Delta P_{min}=11Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=308Pa$
PD3a	WUFI c/ pluviosidade $\Delta P_{min}=44Pa$	GLASER Entre 0h e 4h Entre 17h e 23h $\Delta P_{min}=231Pa$	GLASER Entre 0h e 9h Entre 12h e 23h $\Delta P_{min}=316Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=826Pa$
		WUFI c/ pluviosidade Entre 5h e 16h $\Delta P_{min}=197Pa$	WUFI c/ pluviosidade Entre 10h e 11h $\Delta P_{min}=315Pa$	

**Análise Comparativa de Diferentes Modelos de Simulação Numérica na  
Avaliação da Ocorrência de Condensações Internas**

**Anexo E - Tabela 22 – Comparação entre a simulação numérica do WUFI sem pluviosidade incidente e o método de Glaser com valor médio mensal das condições externas de temperatura e humidade relativa, para o mês de Fevereiro.**

<b>Solução</b>	<b>Face int. reb. ext.</b>	<b>Face int. pano ext.</b>	<b>Face ext. I.T.</b>	<b>Face int. I.T.</b>
<b>PS2</b>	WUFI c/ pluviosidade $\Delta P_{min}=45Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=59Pa$		GLASER $\Delta P_{min}=297Pa$
<b>PS2a</b>	WUFI c/ pluviosidade $\Delta P_{min}=45Pa$	WUFI c/ pluviosidade $\Delta P_{min}=244Pa$		GLASER $\Delta P_{min}=800Pa$
<b>PS3</b>	WUFI c/ pluviosidade $\Delta P_{min}=45Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=39Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=100Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=311Pa$
<b>PD2</b>	WUFI c/ pluviosidade $\Delta P_{min}=45Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=115Pa$		GLASER $\Delta P_{min}=350Pa$
<b>PD2a</b>	WUFI c/ pluviosidade $\Delta P_{min}=45Pa$	WUFI c/ pluviosidade $\Delta P_{min}=221Pa$		GLASER $\Delta P_{min}=669Pa$
<b>PD3</b>	WUFI c/ pluviosidade $\Delta P_{min}=44Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=103Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=165Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=375Pa$
<b>PD3a</b>	WUFI c/ pluviosidade $\Delta P_{min}=44Pa$	WUFI c/ pluviosidade $\Delta P_{min}=197Pa$	GLASER Entre 0h e 2h Entre 18h e 21h $\Delta P_{min}=168Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=694Pa$
			WUFI c/ pluviosidade Entre 3h e 17h Entre 22h e 23h $\Delta P_{min}=196Pa$	

Anexo E - Tabela 23 – Comparação entre a simulação numérica do WUFI sem pluviosidade incidente e o método de Glaser com valores mais gravosos das condições externas de temperatura e humidade relativa, para o dia 21 de Fevereiro.

Solução	Face int. reb. ext.	Face int. pano ext.	Face ext. I.T.	Face int. I.T.
PS2	GLASER $\Delta P_{min}=35Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=-299Pa$ <b>CONDENSAÇÃO SEGUNDO GLASER</b>		GLASER $\Delta P_{min}=119Pa$
PS2a	GLASER Entre 0h e 5h Entre 14h e 23h $\Delta P_{min}=52Pa$	WUFI c/ pluviosidade $\Delta P_{min}=244Pa$		WUFI c/ pluviosidade $\Delta P_{min}=863Pa$
	WUFI c/ pluviosidade Entre 6h e 13h $\Delta P_{min}=45Pa$			
PS3	GLASER $\Delta P_{min}=33Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=-330Pa$ <b>CONDENSAÇÃO SEGUNDO GLASER</b>	GLASER $\Delta P_{min}=-234Pa$ <b>CONDENSAÇÃO SEGUNDO GLASER</b>	GLASER $\Delta P_{min}=146Pa$
PD2	GLASER $\Delta P_{min}=37Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=-155Pa$ <b>CONDENSAÇÃO SEGUNDO GLASER</b>		GLASER $\Delta P_{min}=206Pa$
PD2a	GLASER Entre 0h e 5h Entre 14 e 23h $\Delta P_{min}=52Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=194Pa$		WUFI c/ pluviosidade Entre 0h e 3h $\Delta P_{min}=793Pa$
	WUFI c/ pluviosidade Entre 6h e 13h $\Delta P_{min}=45Pa$			GLASER Entre 4h e 23h $\Delta P_{min}=800Pa$
PD3	GLASER $\Delta P_{min}=29Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=-171Pa$ <b>CONDENSAÇÃO SEGUNDO GLASER</b>	GLASER $\Delta P_{min}=-82Pa$ <b>CONDENSAÇÃO SEGUNDO GLASER</b>	GLASER $\Delta P_{min}=253Pa$
PD3a	GLASER Entre 0h e 5h Entre 14 e 23h $\Delta P_{min}=49Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=178Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=268Pa$	WUFI c/ pluviosidade Entre 0h e 5h $\Delta P_{min}=832Pa$
	WUFI c/ pluviosidade Entre 6h e 13h $\Delta P_{min}=44Pa$			GLASER Entre 6h e 23h $\Delta P_{min}=847Pa$

**Análise Comparativa de Diferentes Modelos de Simulação Numérica na  
Avaliação da Ocorrência de Condensações Internas**

**Anexo E - Tabela 24 – Comparação entre a simulação numérica do WUFI sem pluviosidade incidente e o método de Glaser com valor médio diário das condições externas de temperatura e humidade relativa, para o dia 21 de Fevereiro.**

Solução	Face int. reb. ext.	Face int. pano ext.	Face ext. I.T.	Face int. I.T.
PS2	GLASER $\Delta P_{min}=96Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=-174Pa$ <b>CONDENSAÇÃO SEGUNDO GLASER</b>		GLASER $\Delta P_{min}=184Pa$
PS2a	GLASER $\Delta P_{min}=110Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=394Pa$		GLASER $\Delta P_{min}=1000Pa$
PS3	GLASER $\Delta P_{min}=93Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=-202Pa$ <b>CONDENSAÇÃO SEGUNDO GLASER</b>	GLASER $\Delta P_{min}=-116Pa$ <b>CONDENSAÇÃO SEGUNDO GLASER</b>	GLASER $\Delta P_{min}=206Pa$
PD2	GLASER $\Delta P_{min}=97Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=-58Pa$ <b>CONDENSAÇÃO SEGUNDO GLASER</b>		GLASER $\Delta P_{min}=269Pa$
PD2a	GLASER $\Delta P_{min}=110Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=247Pa$		GLASER $\Delta P_{min}=786Pa$
PD3	GLASER $\Delta P_{min}=90Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=-73Pa$ <b>CONDENSAÇÃO SEGUNDO GLASER</b>	GLASER $\Delta P_{min}=11Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=308Pa$
PD3a	GLASER $\Delta P_{min}=108Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=231Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=316Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=825Pa$
PS4	-	-	GLASER $\Delta P_{min}=88Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=325Pa$
PS5	-	-	GLASER $\Delta P_{min}=-270Pa$ <b>CONDENSAÇÕES SEGUNDO GLASER</b>	GLASER $\Delta P_{min}=-730Pa$ <b>CONDENSAÇÕES SEGUNDO GLASER</b>
PS6	-	-	GLASER 0h Entre 13h e 17h $\Delta P_{min}=197Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=826Pa$
	-	-	WUFI s/ pluviosidade Entre 1h e 12h Entre 18h e 23h $\Delta P_{min}=77Pa$	

**Anexo E - Tabela 25 – Comparação entre a simulação numérica do WUFI sem pluviosidade incidente e o método de Glaser com valor médio mensal das condições externas de temperatura e humidade relativa, para o mês de Fevereiro.**

Solução	Face int. reb. ext.	Face int. pano ext.	Face ext. I.T.	Face int. I.T.
PS2	GLASER Entre 0h e 6h Entre 12h e 23h $\Delta P_{min}=188Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=59Pa$		GLASER $\Delta P_{min}=297Pa$
	WUFI s/ pluviosidade Entre 7h e 11h $\Delta P_{min}=176Pa$			
PS2a	GLASER Entre 0h e 5h Entre 13h e 23h $\Delta P_{min}=197Pa$	GLASER Entre 0h e 9h Entre 18h e 23h $\Delta P_{min}=409Pa$		GLASER $\Delta P_{min}=800Pa$
	WUFI s/ pluviosidade Entre 6h e 12h $\Delta P_{min}=176Pa$	WUFI s/ pluviosidade Entre 10h e 17h $\Delta P_{min}=393Pa$		
PS3	GLASER Entre 0h e 6h Entre 12h e 23h $\Delta P_{min}=187Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=39Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=100Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=311Pa$
	WUFI s/ pluviosidade Entre 7h e 12h $\Delta P_{min}=175Pa$			
PD2	GLASER Entre 0h e 6h Entre 13h e 23h $\Delta P_{min}=189Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=115Pa$		GLASER $\Delta P_{min}=350Pa$
	WUFI s/ pluviosidade Entre 7h e 12h $\Delta P_{min}=174Pa$			
PD2a	GLASER Entre 0h e 5h Entre 13h e 23h $\Delta P_{min}=197Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=302Pa$		GLASER $\Delta P_{min}=669Pa$
	WUFI s/ pluviosidade Entre 6h e 12h $\Delta P_{min}=175Pa$			
PD3	GLASER Entre 0h e 6h Entre 13h e 23h $\Delta P_{min}=184Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=103Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=165Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=375Pa$
	WUFI s/ pluviosidade Entre 7h e 12h $\Delta P_{min}=172Pa$			
PD3a	GLASER Entre 0h e 5h Entre 13h e 23h $\Delta P_{min}=195Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=290Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=353Pa$	GLASER $\Delta P_{min}=694Pa$
	WUFI s/ pluviosidade Entre 6h e 12h $\Delta P_{min}=173Pa$			

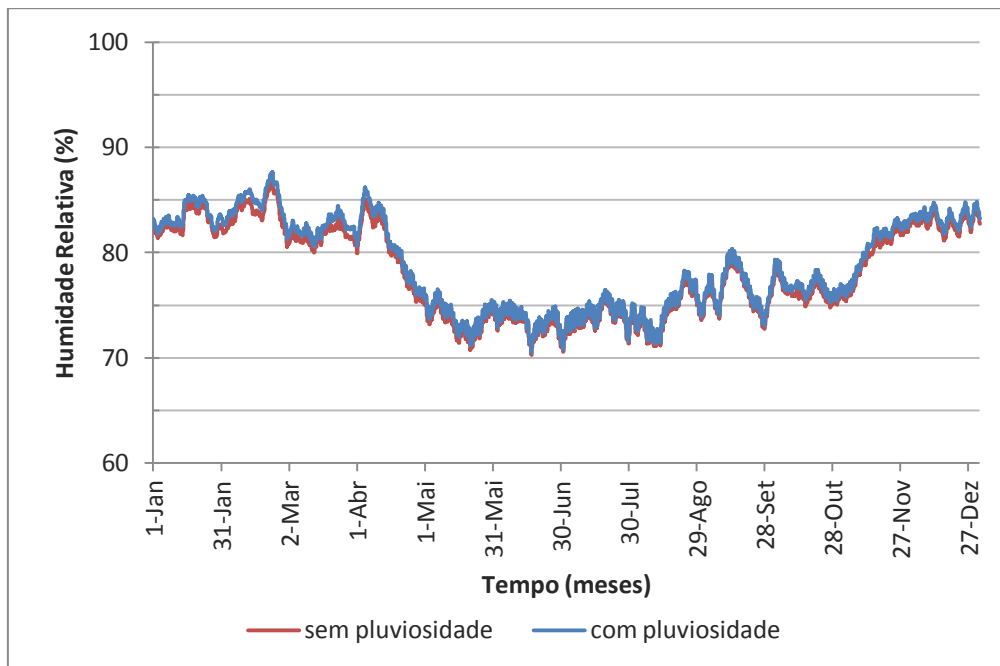
**Análise Comparativa de Diferentes Modelos de Simulação Numérica na  
Avaliação da Ocorrência de Condensações Internas**

<b>PS4</b>	-	-	GLASER Entre 0h e 1h Entre 16h e 17h  $\Delta P_{min}=184Pa$	GLASER Entre 0h e 1h  $\Delta P_{min}=380Pa$
	-	-	WUFI s/ pluviosidade Entre 2h e 15h Entre 18h e 23h  $\Delta P_{min}=103Pa$	WUFI s/ pluviosidade Entre 2h e 23h  $\Delta P_{min}=348Pa$
<b>PS5</b>	-	-	GLASER  $\Delta P_{min}=-320Pa$  <b>CONDENSAÇÃO SEGUNDO GLASER</b>	GLASER  $\Delta P_{min}=12Pa$
<b>PS6</b>	-	-	WUFI s/ pluviosidade Entre 0h e 14h Entre 17h e 23h  $\Delta P_{min}=77Pa$	GLASER  $\Delta P_{min}=318Pa$
	-	-	GLASER Entre 15h e 16h  $\Delta P_{min}=265Pa$	

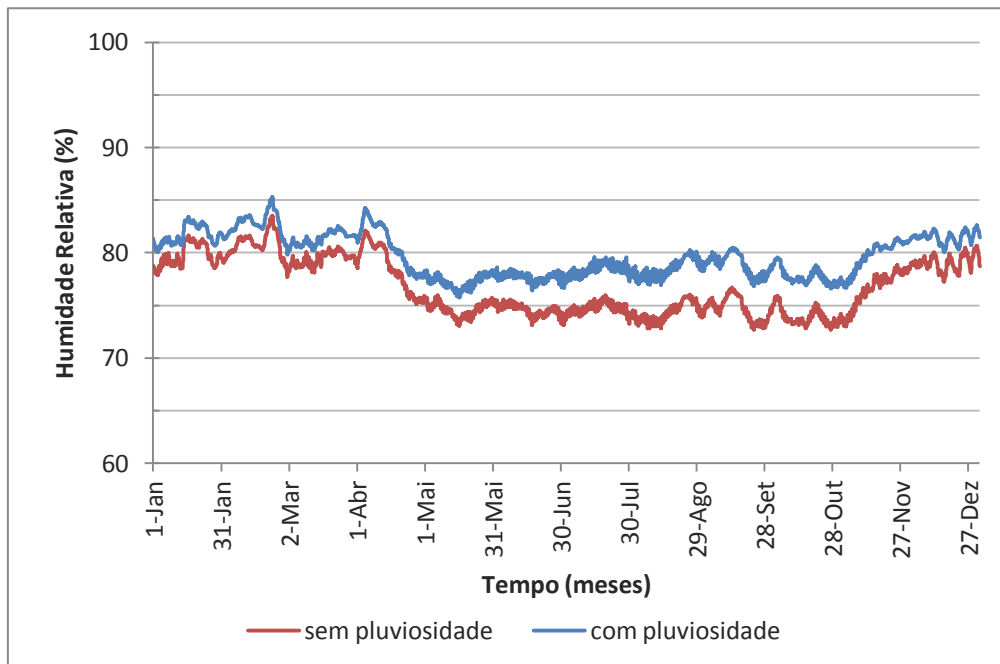
Anexo E - Tabela 26 – Comparação entre a simulação numérica do WUFI sem pluviosidade incidente e o método de Glaser com valor mais gravoso das condições externas de temperatura e humidade relativa, para o dia 21 de Fevereiro.

Solução	Face int. reb. ext.	Face int. pano ext.	Face ext. I.T.	Face int. I.T.
PS2	GLASER $\Delta P_{min}=35\text{Pa}$	GLASER $\Delta P_{min}=-298\text{Pa}$ <b>CONDENSAÇÃO SEGUNDO GLASER</b>		GLASER $\Delta P_{min}=119\text{Pa}$
PS2a	GLASER $\Delta P_{min}=52\text{Pa}$	GLASER $\Delta P_{min}=354\text{Pa}$	WUFI s/ pluviosidade Entre 0h e 13h Entre 19h e 23h $\Delta P_{min}=1008\text{Pa}$	
			GLASER Entre 14h e 18h $\Delta P_{min}=1056\text{Pa}$	
PS3	GLASER $\Delta P_{min}=33\text{Pa}$	GLASER $\Delta P_{min}=-330\text{Pa}$ <b>CONDENSAÇÃO SEGUNDO GLASER</b>	GLASER $\Delta P_{min}=-234\text{Pa}$ <b>CONDENSAÇÃO SEGUNDO GLASER</b>	GLASER $\Delta P_{min}=146\text{Pa}$
PD2	GLASER $\Delta P_{min}=37\text{Pa}$	GLASER $\Delta P_{min}=-155\text{Pa}$ <b>CONDENSAÇÃO SEGUNDO GLASER</b>		GLASER $\Delta P_{min}=206\text{Pa}$
PD2a	GLASER $\Delta P_{min}=52\text{Pa}$	GLASER $\Delta P_{min}=194\text{Pa}$		GLASER $\Delta P_{min}=800\text{Pa}$
PD3	GLASER $\Delta P_{min}=29\text{Pa}$	GLASER $\Delta P_{min}=-171\text{Pa}$ <b>CONDENSAÇÃO SEGUNDO GLASER</b>	GLASER $\Delta P_{min}=-82\text{Pa}$ <b>CONDENSAÇÃO SEGUNDO GLASER</b>	GLASER $\Delta P_{min}=253\text{Pa}$
PD3a	GLASER $\Delta P_{min}=49\text{Pa}$	GLASER $\Delta P_{min}=177\text{Pa}$	GLASER $\Delta P_{min}=268\text{Pa}$	GLASER $\Delta P_{min}=847\text{Pa}$
PS4	-	-	GLASER $\Delta P_{min}=26\text{Pa}$	GLASER $\Delta P_{min}=269\text{Pa}$
PS5	-	-	GLASER $\Delta P_{min}=-912\text{Pa}$ <b>CONDENSAÇÃO SEGUNDO GLASER</b>	GLASER $\Delta P_{min}=-414\text{Pa}$ <b>CONDENSAÇÃO SEGUNDO GLASER</b>
PS6	-	-	GLASER Entre 0h e 2h Entre 13h e 23h $\Delta P_{min}=142\text{Pa}$	GLASER $\Delta P_{min}=149\text{Pa}$
	-	-	WUFI s/ pluviosidade Entre 3h e 12h $\Delta P_{min}=77\text{Pa}$	

## Anexo F – Humidade Relativa em Função do Tempo

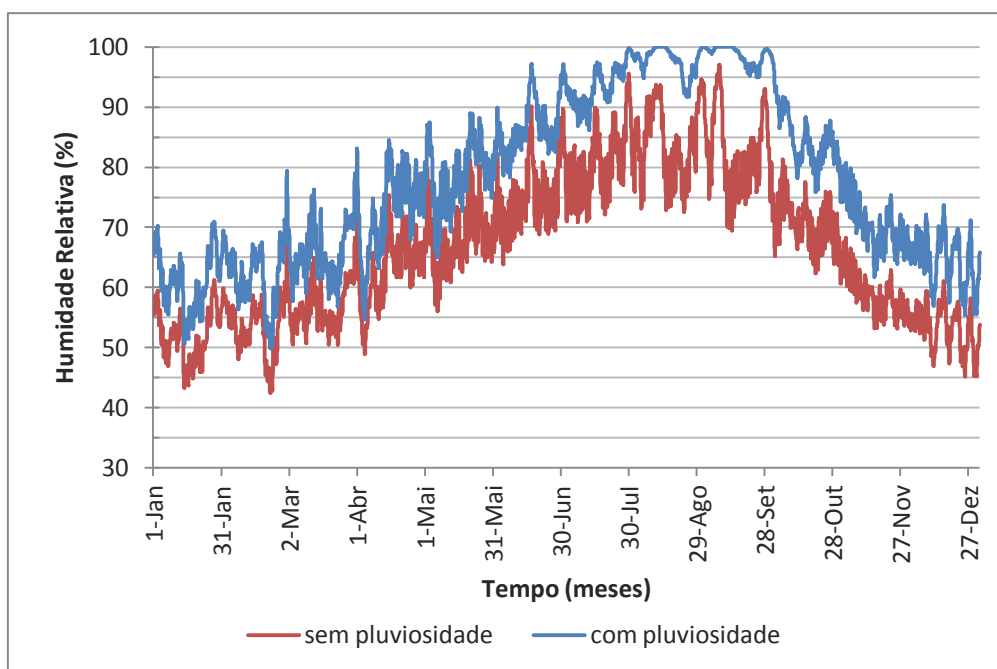


Anexo F – Figura 17 – PS1 – Humidade relativa na face interior do reboco interior ao longo do último ano de simulação, com e sem pluviosidade incidente

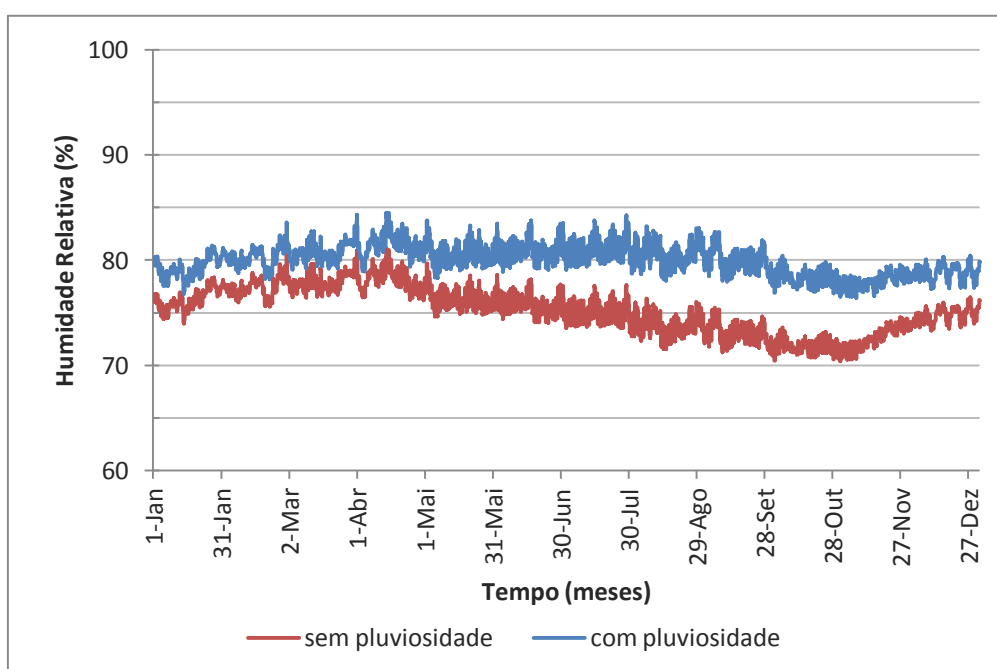


Anexo F – Figura 18 – PS2 – Humidade relativa no centro do isolamento térmico ao longo do último ano de simulação, com e sem pluviosidade incidente



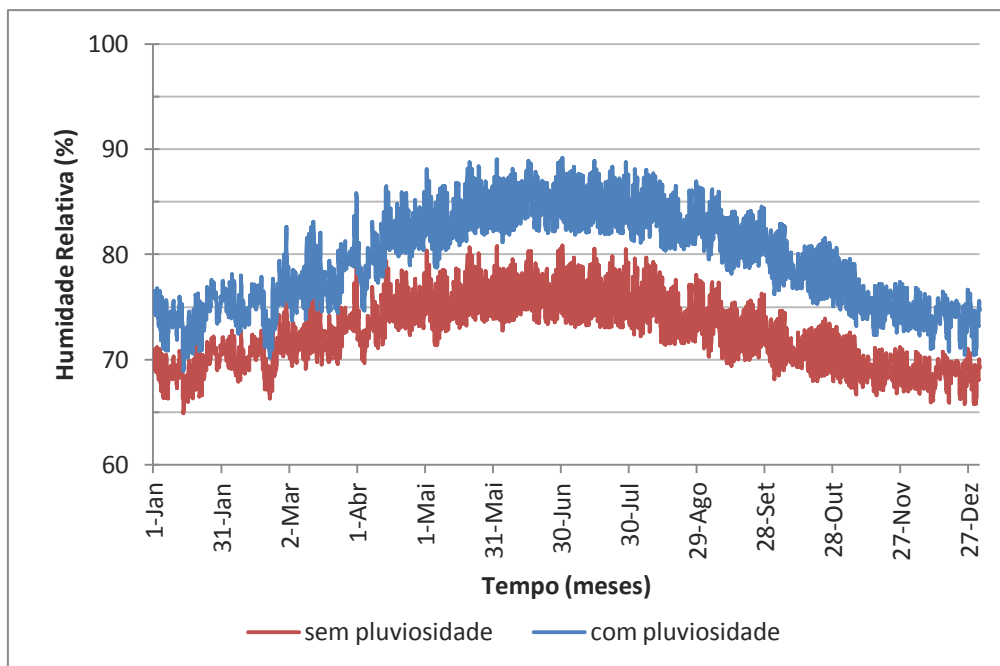


**Anexo F – Figura 19 – PS2a – Humidade relativa na face interior do isolamento térmico ao longo do último ano de simulação, com e sem pluviosidade incidente**

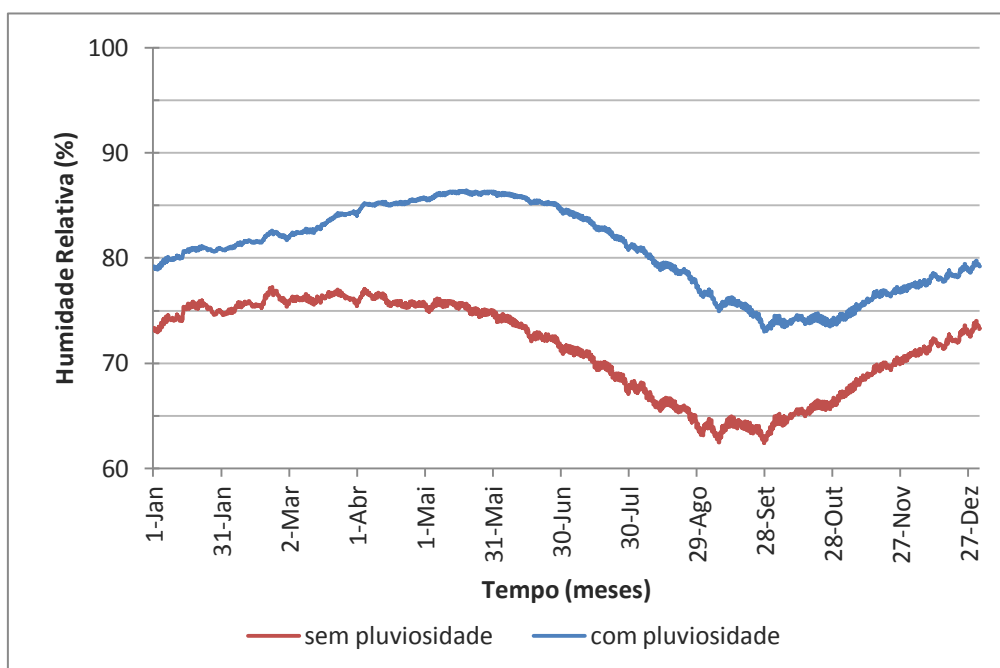


**Anexo F – Figura 20 – PS3 – Humidade relativa na face exterior do isolamento térmico ao longo o último ano de simulação, com e sem pluviosidade incidente.**

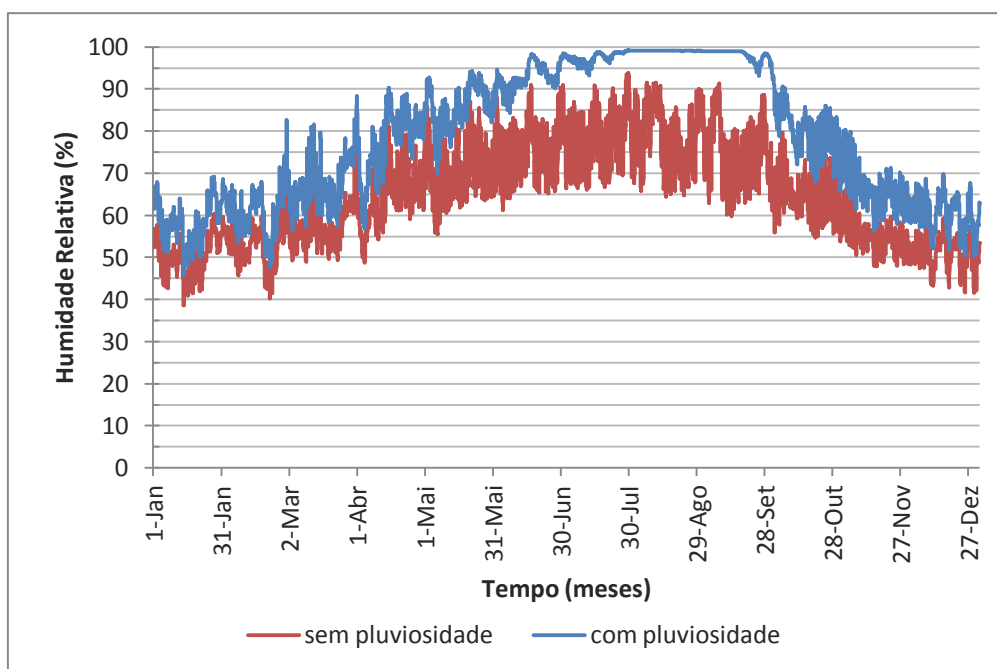
**Análise Comparativa de Diferentes Modelos de Simulação Numérica na Avaliação da Ocorrência de Condensações Internas**



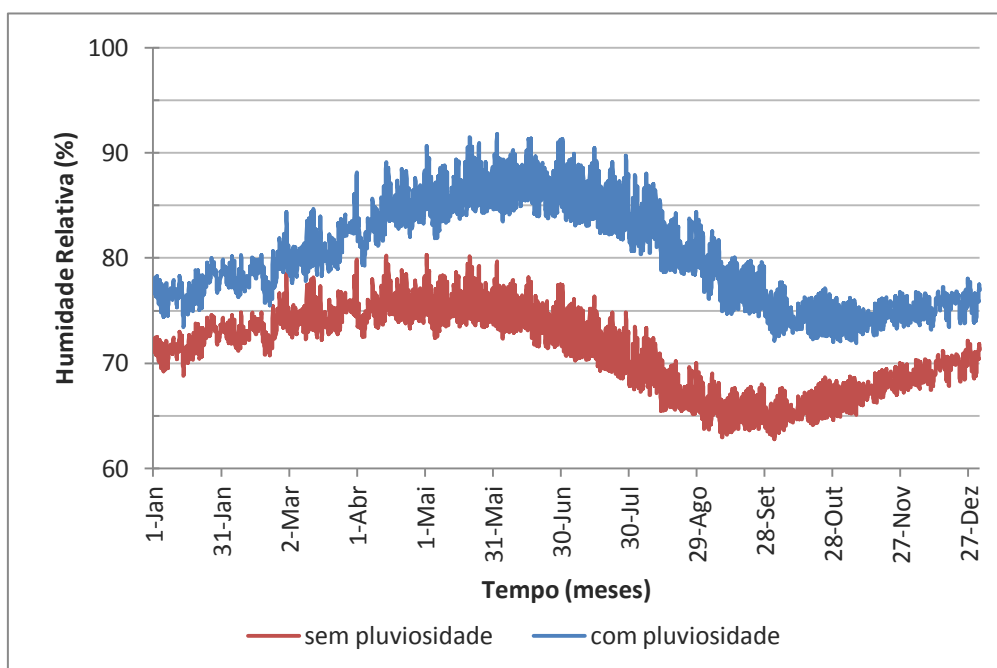
**Anexo F – Figura 21 – PD1 – Humidade relativa na face exterior do pano interior de alvenaria ao longo do último ano de simulação, com e sem pluviosidade incidente**



**Anexo F – Figura 22 – PD2 – Humidade relativa na face exterior do isolamento térmico ao longo do último ano de simulação, com e sem pluviosidade incidente**

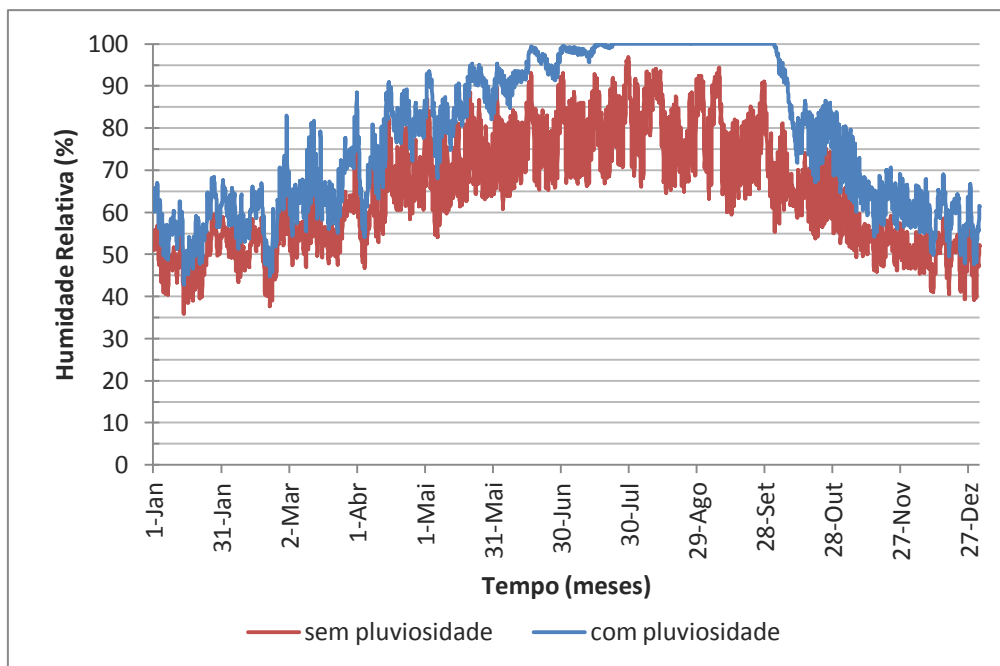


Anexo F – Figura 23 – PD2a – Humidade relativa na face interior do isolamento térmico ao longo do último ano de simulação com e sem pluviosidade incidente

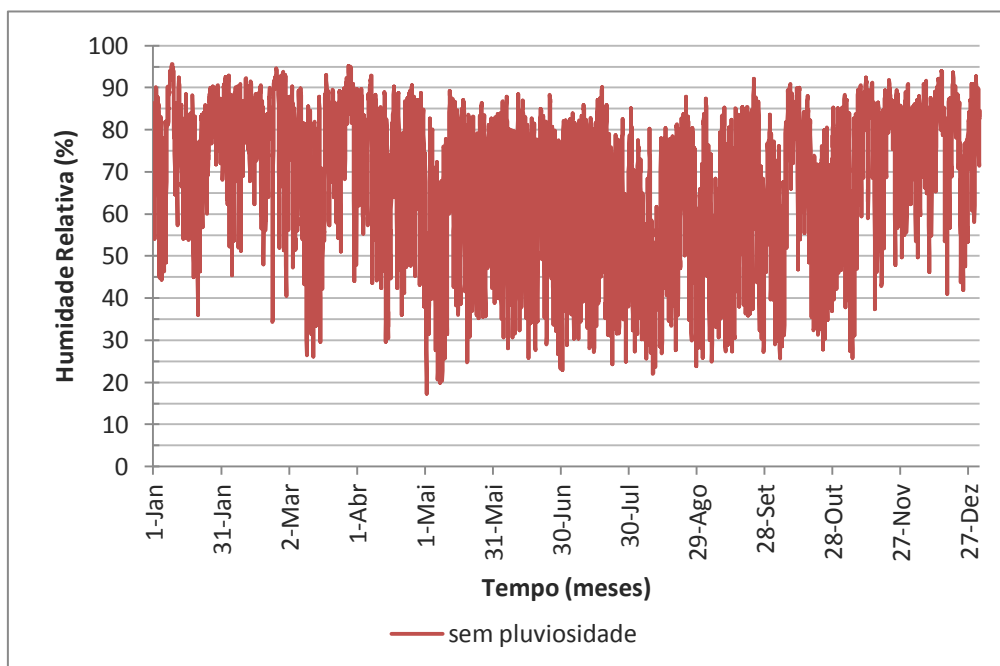


Anexo F – Figura 24 – PD3 – Humidade relativa na face exterior do isolamento térmico ao longo do último ano de simulação com e sem pluviosidade incidente

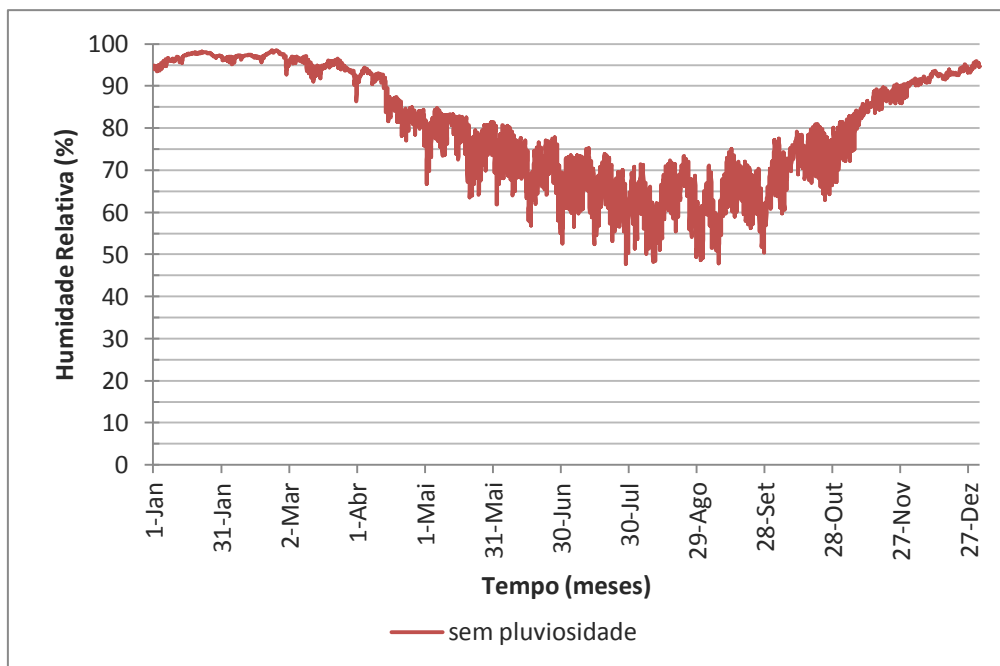
**Análise Comparativa de Diferentes Modelos de Simulação Numérica na Avaliação da Ocorrência de Condensações Internas**



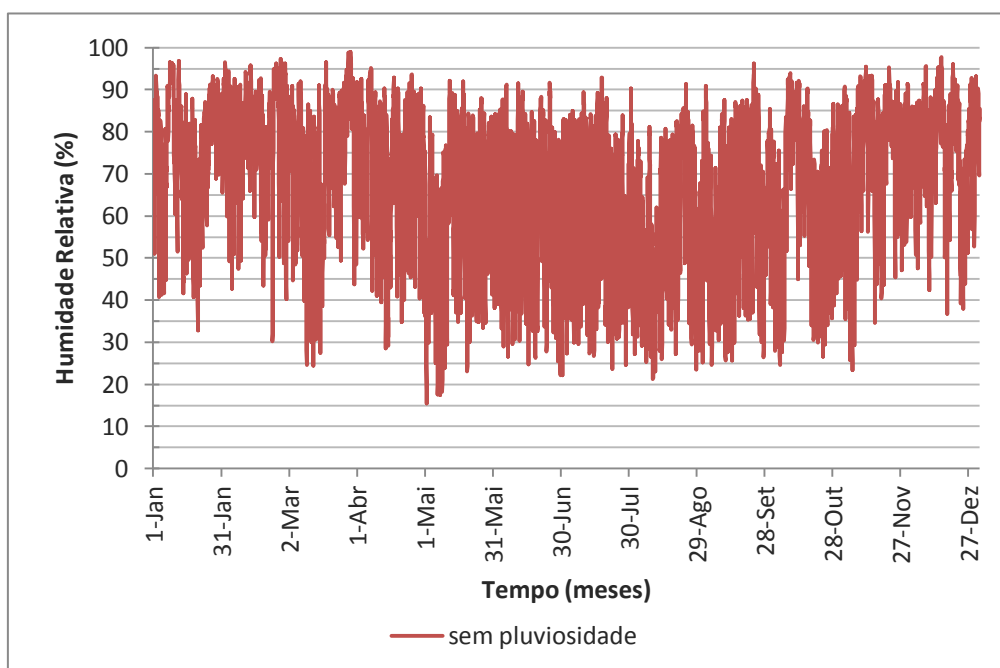
**Anexo F – Figura 25 – PD3a – Humidade relativa na face interior do isolamento térmico ao longo do último ano de simulação, com e sem pluviosidade incidente**



**Anexo F – Figura 26 – PS4 – Humidade relativa na face exterior do isolamento térmico ao longo do último ano de simulação, com e sem pluviosidade incidente**



Anexo F – Figura 27 – PS5 – Humidade relativa na face exterior do isolamento térmico ao longo do último ano de simulação, com e sem pluviosidade incidente



Anexo F – Figura 28 – PS6 – Humidade relativa na face exterior do isolamento térmico ao longo do último ano de simulação, com e sem pluviosidade incidente